

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

Previsão do Gradiente de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-Água

Autor: Kilmer Ferreira de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Brasília, DF
2020



Kilmer Ferreira de Oliveira

Previsão do Gradiente de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-Água

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Brasília, DF

2020

Kilmer Ferreira de Oliveira

Previsão do Gradiente de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-
Água/ Kilmer Ferreira de Oliveira. – Brasília, DF, 2020-
68 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Chagas Storti

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2020.

1. Escoamento Multifásico. 2. Beggs e Brill. I. Prof. Dr. Felipe Chagas Storti.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Previsão do Gradiente
de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-Água

CDU 02:141:005.6

Kilmer Ferreira de Oliveira

Previsão do Gradiente de Pressão em Escoamento Bifásico Horizontal Ar-Água

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, Dezembro de 2020:

Prof. Dr. Felipe Chagas Storti
Orientador

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noletto
Convidado 1

**Profa. Dra. Tallita Karoline Nunes
Rocha**
Convidado 2

Brasília, DF
2020

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus pelo dom da vida, e a Nossa Senhora de Guadalupe pela poderosa intercessão.

Aos meus familiares, especialmente meu pai Rick Marantz, minha mãe Darleia e meus irmãos Klyssmann e Giovanna.

À minha namorada Cleiciane por todo apoio e companheirismo em cada momento, assim como seus familiares.

Aos meus amigos de faculdade que estiveram comigo em diferentes etapas sempre me motivando: Thiago, Rafael, Pedro, Gabriela, Rebeka, Fabrício, Francisco e Milena.

Ao Professor Felipe Storti, que abriu a porta desse projeto e me deu a oportunidade de elaborar este trabalho.

À minha companheira de pesquisa Danyelle pela parceria e amizade neste período.

Ao Amon Martins, grande amigo e professor, que foi diferencial para meu crescimento profissional como engenheiro e também ao Ivo Mascena, pela oportunidade de ingresso no mercado de trabalho, acreditando em meu potencial desde o início.

E a todo o corpo docente da Universidade de Brasília, responsáveis pela minha formação.

*"Nunca deixe de sonhar, nunca deixe de acreditar, pois há uma chance de ser feliz e
basta só você querer"
(Giles Thiago)*

Resumo

Este trabalho apresenta uma contextualização sobre escoamento multifásico, demonstrando os conceitos básicos utilizados para os estudos deste tema, com foco principal no cálculo do gradiente de pressão. Um escoamento multifásico ocorre quando dois ou mais componentes estão presentes ao longo do escoamento, como por exemplo água e ar. O cálculo do gradiente de pressão envolve a definição do padrão de escoamento através de mapas de escoamento que são formas de representar os padrões formados pela mistura, ao variar a velocidade de seus componentes. Existem diversos modelos para a previsão do gradiente de pressão, neste trabalho será utilizado o Modelo Homogêneo e o Modelo de Beggs e Brill, aplicados para um escoamento horizontal ar-água no padrão de bolhas. Logo, foi realizado neste trabalho uma comparação entre o resultado obtido por meio dos modelos de previsão e os dados reais. Para a obtenção dos dados reais foi construída uma bancada experimental de escoamento multifásico no Laboratório de Termofluidos, situado na Universidade de Brasília. Devido a pandemia mundial no ano de 2020 os dados não puderam ser coletados presencialmente na bancada construída, então foram utilizados dados fornecidos gentilmente pelo Prof. Dr. Marcelo de Castro, da Universidade Estadual de Campinas. A partir do comparativo entre os dados teóricos e os dados reais os modelos foram validados para o cálculo de gradiente de pressão.

Palavras-chave: Escoamento Multifásico. Modelo Homogêneo. Beggs e Brill.

Abstract

This work show a contextualization about multiphase flow, demonstrating the basic concepts usually used to the study of this theme, with the main focus on de pressure drop. A multiphase flow occurs when the flow have two or more elements. For calculating the pressure drop, it's necessary to know the pattern flow through flow maps, that are ways to show the pattern flow with varying phase velocity. There are many models to predict the pressure drop, but in this study the Homogeneous Model and Beggs and Brill Model are used, for air-water horizontal flow on the bubbles flow pattern. Therefore, in this work a comparison was perfomed between the result obtained through the prediction models and the real data. To obtain the real data, an experimental multiphase flow bench was built at the Laboratory of Thermofluids, located at the University of Brasília. Due to the worldwide pandemic in the year 2020, the data could not be collected in person on the built bench, so data provided by Prof. Dr. Marcelo de Castro, from the State University of Campinas. From the comparison between the theoretical data and the real data, the models were validated for the pressure gradient calculation.

Key-words: Multiphase Flow. Homogeneous Model. Beggs and Brill.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Áreas ocupadas pelas fases em um escoamento bifásico.	17
Figura 2 – Padrões para um escoamento gás-líquido vertical	22
Figura 3 – Padrões para um escoamento gás-líquido horizontal	23
Figura 4 – Mapa de escoamento proposto por Baker	25
Figura 5 – Mapa de escoamento proposto por Taitel de Dukler	25
Figura 6 – Mapa de escoamento proposto por Mandhane	26
Figura 7 – Esquemático do modelo Homogêneo	27
Figura 8 – Esquemático do modelo de fases separadas	28
Figura 9 – <i>Holdup</i> e ângulo.	39
Figura 10 – Esquemático da Bancada experimental	42
Figura 11 – Componentes da bancada experimental	43
Figura 12 – Suporte da Bancada	44
Figura 13 – Conexão de Nylon	44
Figura 14 – Bancada de Escoamento Multifásico	45
Figura 15 – Mapa de Escoamento Utilizando os Dados Experimentais	49
Figura 16 – Comportamento do Holdup no Modelo Homogêneo	51
Figura 17 – Gradiente de Pressão e Holdup no Modelo Homogêneo	52
Figura 18 – Comportamento do Holdup no Modelo de Beggs e Brill	53
Figura 19 – Gradiente de Pressão Beggs e Brill	54
Figura 20 – Comportamento do Gradiente de Pressão.	55
Figura 21 – Comparativo do Holdup.	56
Figura 22 – Gradiente de Pressão Real	57

Lista de tabelas

Tabela 1	– Coeficientes para o cálculo do <i>holdup</i> .	40
Tabela 2	– Coeficientes para o cálculo do fator de correção.	40
Tabela 3	– Coeficientes para o cálculo do fator de correção.	47
Tabela 4	– Propriedades.	47
Tabela 5	– Pressão Inicial.	48
Tabela 6	– Resultados - Modelo Homogêneo	50
Tabela 7	– Resultados - Modelo de Beggs e Brill	53
Tabela 8	– Resultados - Gradientes de Pressão em mbar	56

Lista de abreviaturas e siglas

A	Área de seção transversal
B	Constante
C	Fração Volumétrica de Injeção
c	Velocidade de Propagação do Som
D	Diâmetro
E	Fator de Correção para Inclinação
F	Fator de Correção para o Fator de Atrito
f	Fator de Atrito
Fr	Número de Froude
G	Fluxo Mássico
g	Gravidade
H	<i>Holdup</i>
J	Velocidade Superficial
k_r	Rugosidade
L	Constante
M	Número de Mols
Ma	Número de Mach
m	Massa
N	Número de Velocidade
V	Velocidade
P	Momento Linear
p	Pressão
Q	Vazão Volumétrica

R	Constante dos Gases Ideais
Re	Número de Reynolds
s	Escorregamento
S	Perímetro Molhado
T	Temperatura
t	Tempo
W	Vazão Mássica
x	Título
y	Relação entre fração volumétrica com e sem deslizamento
Z	Fator de Compressibilidade

Outros Caracteres

α	Fração Volumétrica de Vazio
ρ	Massa Específica
λ	Fração Volumétrica sem Deslizamento
θ	Ângulo de Inclinação
V	Fração de Vazio
τ	Tensão Cisalhante
ψ	Relação entre <i>holdup</i> horizontal e inclinado
σ	Tensão Superficial
μ	Viscosidade Dinâmica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto	15
1.2	Problema	15
1.3	Objetivo Geral	15
1.3.1	Objetivos Específicos	15
1.4	Organização do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Conceitos e Definições	17
2.2	Notação Básica de Escoamento Bifásico	18
2.3	Padrões de Escoamento	21
2.3.1	Escoamento Vertical	22
2.3.2	Escoamento Horizontal	23
2.4	Mapas de Escoamento	24
2.5	Modelos de Previsão de Gradiente de Pressão	26
3	METODOLOGIA	30
3.1	Modelo Homogêneo	30
3.1.1	Balanço de Massa	30
3.1.2	Massa Específica da Mistura	31
3.1.3	Equação da Quantidade de Movimento	32
3.1.4	Componente Friccional	33
3.1.5	Componente Aceleracional	34
3.1.6	Modelagem Final	35
3.2	Modelo de Beggs e Brill	36
3.2.1	Componente Friccional	36
3.2.2	Componente Aceleracional	36
3.2.3	Gradiente de Pressão Final	38
3.2.4	Definição do Padrão de Escoamento	38
3.2.5	Correlação para o <i>Holdup</i>	39
3.2.6	Correlação para o Fator de Atrito	41
4	DESENVOLVIMENTO	42
4.1	Materiais	42
4.2	Procedimento Experimental	45
4.3	Dados Experimentais	46

4.4	Considerações para a Aplicação dos Modelos	46
4.4.1	Modelo Homogêneo	46
4.4.2	Modelo de Beggs e Brill	48
5	RESULTADOS	49
5.1	Gradiente de Pressão - Modelo Homogêneo	50
5.2	Gradiente de Pressão - Modelo de Beggs e Brill	52
5.3	Análise Comparativa	54
6	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICES	62
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO MODELO HOMOGÊNEO	63
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO MODELO DE BEGGS E BRILL	66

1 Introdução

O escoamento multifásico ocorre quando dois ou mais componentes estão presentes ao longo do escoamento e está presente em várias indústrias como a petrolífera, química e nuclear. Na indústria petrolífera o escoamento multifásico ocorre nas tubulações, onde escoam óleo, gás e em alguns casos a água. Na indústria química pode ser observado nos sistemas de refrigeração, condensação ou evaporação, onde há a necessidade de bombeamento de líquido que por vezes, pela baixa pressão, pode estar envolvido com sua parte gasosa. Já na indústria nuclear o escoamento multifásico é encontrado no sistema de refrigeração do reator, onde as propriedades de transferência de calor são de suma importância. (BEGGS; BRILL, 1973)

O entendimento do escoamento multifásico é muito mais frequente na indústria petrolífera pois, mesmo nas condições de baixa temperatura e pressão, os poços apresentam alta quantidade de gás sendo inevitável o fluxo de um escoamento multifásico durante o processo de extração de petróleo. (PEREIRA, 2009)

O grande impacto nesta indústria ocorre devido ao fato de ser uma produção predominantemente *offshore*, acarretando então no transporte da mistura multifásica por longas distâncias. O dimensionamento dos dutos, o sistema de separação e o sistema de bombeamento são dependentes do estudo do escoamento multifásico além de ser uma grande parcela do orçamento da indústria. (PROVENZANO, 2007)

Surgiram então vários estudos ao longo do tempo para entender e equacionar esse tipo de escoamento e verificou-se que os escoamentos multifásicos apresentam diversas configurações espaciais, chamadas de padrões de escoamento, para certas variações de propriedades do escoamento, principalmente a velocidade dos componentes presentes. Logo alguns autores transformaram esses limites entre os padrões em diagramas, chamados mapa de fluxo ou carta de escoamento como Taitel e Dukler (1976), Baker (1954), Mandhane (1973).

Com os padrões definidos buscou-se construir métodos capazes de prever o gradiente de pressão para o escoamento multifásico, que tem como principal objetivo assegurar a garantia do escoamento ao longo dos poços dutos de petróleo. Surgiram então modelos para diversas condições de escoamento: gás-líquido, líquido-líquido, gás ou líquido-sólido, vertical e horizontal. Em relação ao escoamento bifásico em geral, que é o tema deste trabalho, surgiram modelos cinemáticos, dinâmicos e empíricos, cada um com sua complexidade e grau de precisão. (VELEZ, 2016)

1.1 Contexto

Um engenheiro de energia deve ser capaz de supervisionar e gerenciar os processos que envolvem energia em uma indústria. Nas indústrias em geral o uso de energia, em todas as suas formas, está presente desde a primeira até a última etapa do processo produtivo, como por exemplo a indústria petrolífera, na qual grande parte do gasto energético está no transporte do petróleo, que contém mais de uma fase na tubulação. Portanto o estudo do gradiente de pressão para escoamento multifásico se faz necessário para o projeto mais adequado do sistema de transporte de petróleo (bombas, tubulações e singularidades), tornando o sistema mais eficiente.

1.2 Problema

Conhecendo a importância da definição de parâmetros do escoamento multifásico, busca-se modelos matemáticos capazes de descrever estes parâmetros e, de posse de um laboratório experimental, validar os resultados obtidos.

Sendo assim, a pergunta de pesquisa definida neste trabalho é:

“Qual é o comportamento do gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água, ao utilizar um cálculo por meio de métodos matemáticos e empíricos, quando comparado com o medido experimentalmente?”

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo aplicar o modelo de Beggs e Brill e o modelo Homogêneo para previsão teórica de queda de pressão em um escoamento bifásico horizontal ar-água. Através de dados experimentais de queda de pressão, fornecidos gentilmente através do Prof. Dr Marcelo de Castro, da Universidade Estadual de Campinas, será realizado um comparativo entre o resultado da aplicação dos modelos teóricos e o resultado real de gradiente de pressão. Também será identificado o *Holdup* para cada modelo teórico e comparado com o *Holdup* experimental. Além destas análises, será construída uma bancada de escoamento multifásico em laboratório.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Utilizar o modelo Homogêneo e o modelo de Beggs e Brill para o cálculo do gradiente de pressão e do *Holdup* para um escoamento bifásico ar-água.
- Construir uma bancada para testes de escoamento bifásico.
- Analisar os dados de gradiente de pressão e *Holdup* coletados experimentalmente.

- Comparar os resultados obtidos através da aplicação dos modelos com os dados experimentais.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresentou uma breve introdução do tema, justificativa, problema de pesquisa, contextualização e objetivos;
- **Capítulo 2 - Referencial teórico:** Descreve os conceitos que fundamentam o trabalho reunindo conhecimento necessário para que se compreenda a pesquisa realizada. O capítulo é subdividido nas seções *Conceitos e Definições*, *Notação Básica de Escoamento Bifásico*, *Padrões e Mapas de Escoamento* e *Modelos de Previsão de Gradiente de Pressão* ;
- **Capítulo 3 -Metodologia:** Mostra detalhamento matemático dos modelos adotados e os materiais a serem utilizados para o trabalho de conclusão de curso 2;
- **Capítulo 4 - Desenvolvimento:** Apresenta os materiais e procedimentos da bancada experimental, os dados utilizados e as condições de aplicação dos modelos.
- **Capítulo 5 - Resultados:** Apresenta os resultados alcançados durante o desenvolvimento do trabalho.
- **Capítulo 6 - Conclusão:** Resume os resultados alcançados durante todo o Trabalho de Conclusão de Curso.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo apresenta-se a terminologia e conceitos básicos, visando facilitar o entendimento acerca dos principais temas deste trabalho. Define as variáveis básicas, os padrões, mapas e uma revisão dos modelos aplicados ao escoamento multifásico.

2.1 Conceitos e Definições

O escoamento multifásico surge quando duas fases escoam simultaneamente em uma tubulação. As duas fases tendem a se separar devido às diferentes massas específicas e isso gera uma diferença entre as tensões de cisalhamento para cada fase. O deslizamento entre as fases ocorre quando as duas não viajam na mesma velocidade, essa variação da velocidade é dada pela diferença de pressão, por exemplo quando o gás expande juntamente com uma diminuição na pressão leva a um aumento na fração volumétrica do gás. (BRILL; MUKHERJEE, 1999)

Há também uma definição de escoamento multifásico como um escoamento onde duas ou mais substâncias escoam simultaneamente (não necessariamente duas fases distintas) como por exemplo óleo e água. (WALLIS, 1969)

A figura 1 mostra a distribuição das áreas ocupadas pelas fases no escoamento bifásico e a mudança na relação de áreas quando há uma diminuição de pressão. O holdup (H) é a fração volumétrica da fase líquida quando se considera o deslizamento entre as fases, e a fração volumétrica da fase líquida quando o deslizamento é desconsiderado é representado por λ_L . De uma forma geral os sufixos L e G são utilizados para identificar as fases líquida e gasosa, respectivamente. (GUEDES, 2015)

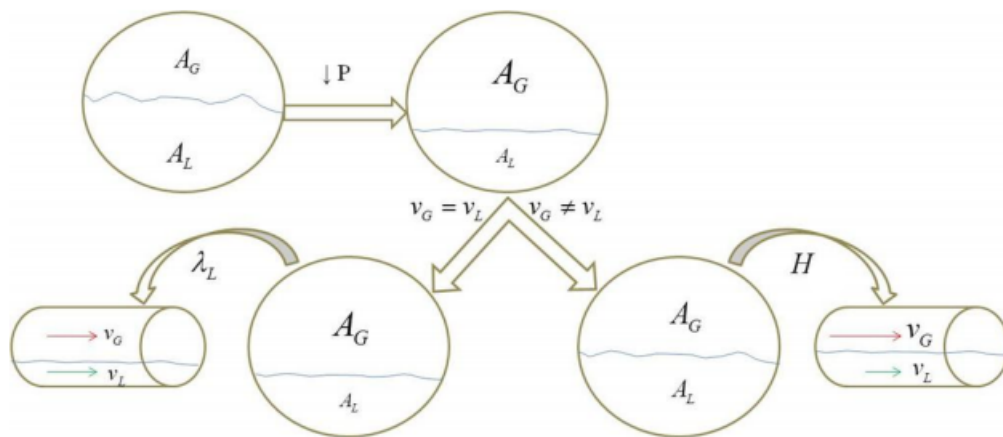


Figura 1 – Áreas ocupadas pelas fases em um escoamento bifásico. Adaptado de Guedes (2015)

Para o cálculo do gradiente de pressão em um escoamento multifásico é necessário entender como as fases estão dispostas espacialmente, essa disposição é denominada de padrão de escoamento. Para diferentes valores de velocidade das fases existem diferentes tipos de padrão de escoamento, estes serão definidos ao longo deste trabalho. (BRAGA, 2016)

2.2 Notação Básica de Escoamento Bifásico

Vazão Mássica da Mistura (W)

A vazão mássica da mistura é dada pela soma das vazões mássicas de cada componente da mistura (gás ou líquido)

$$W = W_L + W_G \quad (2.1)$$

Vazão Volumétrica da Mistura (Q)

A vazão volumétrica de cada componente é calculada com a relação entre vazão mássica e massa específica. A vazão volumétrica da mistura é a soma das vazões de cada componente. O índice k representa o líquido ou o gás, tendo em vista que a equação é a mesma para ambas as fases.

$$Q_k = \frac{W_k}{\rho_k} \quad (2.2)$$

$$Q = Q_L + Q_G \quad (2.3)$$

Holdup e Fração de Vazio (H e α)

O *holdup* não possui tradução literal mas pode ser interpretado como a "contenção" de uma fase por outra, em um escoamento multifásico. Matematicamente o *holdup* (H) do líquido (ou fração volumétrica *in situ*) determina a fração do componente líquido na mistura através da sua área ocupada, em qualquer instante. Já a fração de vazio (α) é a fração do componente gasoso na mistura, calculada através de sua área ocupada em qualquer instante. A soma do *holdup* e da fração de vazio é sempre igual a 1.

$$H = \frac{A_L}{A} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{A_G}{A} \quad (2.5)$$

$$H + \alpha = 1 \quad (2.6)$$

Também é possível relacionar as frações volumétricas com o conceito de velocidade superficial, definido em 2.11:

$$H = \frac{J_L}{J} \quad (2.7)$$

$$\alpha = \frac{J_G}{J} \quad (2.8)$$

Fração Volumétrica de Injeção (C) Também denotada como fração volumétrica sem escorregamento. A fração volumétrica de injeção é dada pela razão entre as vazões volumétricas de cada componente e a vazão volumétrica da mistura. Em algumas literaturas este parâmetro também é denotado como λ .

$$C_k = \frac{Q_k}{Q} \quad (2.9)$$

$$C_L + C_G = 1 \quad (2.10)$$

Velocidade Superficial (J)

A razão entre a vazão volumétrica de cada componente e a área da seção transversal da tubulação definem a velocidade superficial. Através da soma das vazões volumétricas de cada componente também define-se a velocidade superficial da mistura.

$$J_k = \frac{Q_k}{A} \quad (2.11)$$

$$J = J_L + J_G \quad (2.12)$$

Como a velocidade superficial e a fração volumétrica de injeção são parâmetros que dependem diretamente da vazão volumétrica, pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{J_L}{J_G} = \frac{C_L}{C_G} = \frac{Q_L}{Q_G} \quad (2.13)$$

Velocidade Real (V)

Também conhecida como velocidade *in situ*, a velocidade real é determinada, para cada componente, através da razão entre vazão volumétrica e a área ocupada pelo componente.

$$V_k = \frac{Q_k}{A_K} \quad (2.14)$$

O produto entre a velocidade real e o hold-up (ou fração de vazio) é também uma forma de determinar a velocidade superficial de cada componente. Esta relação é válida pois ambos envolvem vazão volumétrica e área.

$$J_L = H \times V_L \quad (2.15)$$

$$J_G = \alpha \times V_G \quad (2.16)$$

Como H e α são sempre valores menores que um, para escoamento bifásico, percebe-se que a velocidade real sempre será maior que a velocidade superficial.

Fluxo Mássico (G)

Através da vazão mássica e da área de seção transversal, pode-se definir o fluxo mássico:

$$G_k = \frac{W_k}{A} \quad (2.17)$$

Utilizando a equação 2.2 e a equação 2.11, o fluxo mássico também é definido por:

$$G_k = \rho \times J_k \quad (2.18)$$

Velocidade Relativa (V_{kj})

A velocidade relativa é definida como a diferença entre as velocidades reais de cada componente.

$$V_{GL} = V_G - V_L = -V_{LG} \quad (2.19)$$

Velocidade de Deslizamento (V_{kJ})

A diferença entre a velocidade real de um componente e a velocidade superficial da mistura determina a velocidade de deslizamento.

$$V_{kJ} = V_k - J \quad (2.20)$$

Escorregamento (s)

Também chamado de deslizamento, o escorregamento é uma das mais importantes características do escoamento multifásico e é causado pela diferença de propriedades entre os dois componentes (como massa específica e viscosidade). O escorregamento é calculado através da razão das velocidades reais.

$$s = \frac{V_G}{V_L} \quad (2.21)$$

Título (x)

O título é a razão da vazão mássica do gás em relação a vazão mássica da mistura.

$$x = \frac{W_G}{W} \quad (2.22)$$

Número de Froude (Fr)

O número de Froude é capaz de relacionar a força de inércia e a força gravitacional presentes no escoamento. Como a inércia remete a energia cinética e a força da gravidade remete a energia potencial, surge uma segunda interpretação do número de Froude: a relação entre energia potencial e cinética.

$$Fr = \frac{J^2}{gD} \quad (2.23)$$

Número de Reynolds (Re)

O número de Reynolds é um número adimensional utilizado para a definição do regime de escoamento: Laminar, em transição ou turbulento. O escoamento é considerado laminar quando $Re < 2400$, em transição quando $2400 < Re < 4000$ e turbulento quando $Re > 4000$.

$$Re = \frac{\rho J D}{\mu} \quad (2.24)$$

2.3 Padrões de Escoamento

Como já definido o padrão de escoamento é a forma em que as fases estão dispostas espacialmente, e a mudança nesta disposição depende das propriedades dos fluidos, condições de operação (temperatura, gravidade e pressão), geometria da tubulação e vazão das fases. (WHALLEY, 1996)

O escoamento multifásico pode ser classificado quanto as fases presentes e comumente são: líquido-líquido e gás-líquido. Estas misturas podem ser agrupadas em três categorias gerais: Distribuído, intermitente e segregado. (CASTRO, 2013)

- Distribuído (disperso): Escoamento com presença de bolhas de uma das fases dispersas na fase contínua.

- Intermitente: Caracterizado pela alternância de tempo e espaço entre as fases.
- Segregado (fases separadas): O escoamento se encontra com as duas fases separadas, podendo ter uma fase acima da outra ou uma fase escoando em volta da outra.

Abaixo serão detalhados os padrões de escoamento para uma mistura gás-líquido posicionados verticalmente e horizontalmente.

2.3.1 Escoamento Vertical

Para um escoamento vertical existem os padrões de bolhas, bolhas dispersas, pistonado, agitante e anular. A figura 2 mostra o desenho destes padrões em uma tubulação para um escoamento gás-líquido..

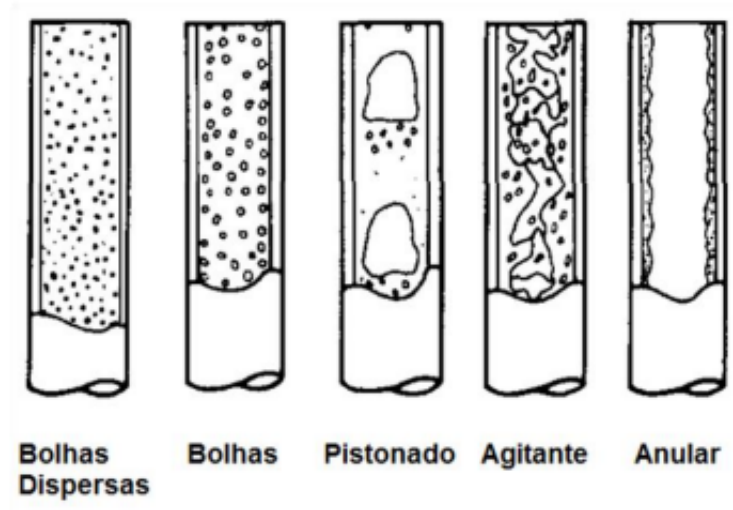


Figura 2 – Padrões para um escoamento gás-líquido vertical. (CASTRO, 2013)

O padrão de bolhas dispersas para um escoamento vertical ocorre a uma alta velocidade do líquido onde a fase com menor massa específica (gás) fica dispersa na fase de maior massa específica (líquido) de uma forma contínua e discreta. Não há deslizamento entre as fases pois a fase líquida carrega a fase gasosa devido sua alta velocidade. (SHOHAM, 2005)

No padrão de bolhas a fase gasosa fica dispersa na fase líquida na forma de pequenas bolhas que se movem de forma aleatória. A distribuição de bolhas é homogênea ao longo da tubulação e como resultado do alto *holdup* do líquido e baixa velocidade há o deslizamento entre as fases. As bolhas causam pouca turbulência no escoamento. (SHOHAM, 2005)

Para o padrão pistonado a maior parte da fase gasosa é alocada na chamada bolha de Taylor, que são em forma de balão com o mesmo diâmetro da tubulação. A fase líquida

escoa de forma intercalada à fase gasosa como se um pistão estivesse liberando a entrada da fase líquida. Pequena parte da fase gasosa penetra na fase líquida em uma zona de mistura por meio de pequenas bolhas. (SHOHAM, 2005)

O padrão agitante é semelhante ao padrão pistonado porém apresenta um comportamento mais caótico aonde não existe divisões claras entre as fases. Ele é considerado um padrão de transição entre o pistonado e o anular e ocorre com alta velocidade da fase gasosa. (SHOHAM, 2005)

A alta velocidade do gás também caracteriza o padrão anular que conta com algumas gotas do líquido no escoamento e uma fina camada ao longo da parede da tubulação escoando de forma lenta. Neste caso surge no escoamento uma alta tensão cisalhante e para o escoamento vertical a camada de líquido é aproximadamente uniforme. (SHOHAM, 2005)

2.3.2 Escoamento Horizontal

Para um escoamento gás-líquido horizontal os padrões são semelhantes ao do escoamento vertical, como mostra a figura 3, com a exclusão do padrão agitante e a adição dos padrões estratificado e bolhas alongadas.

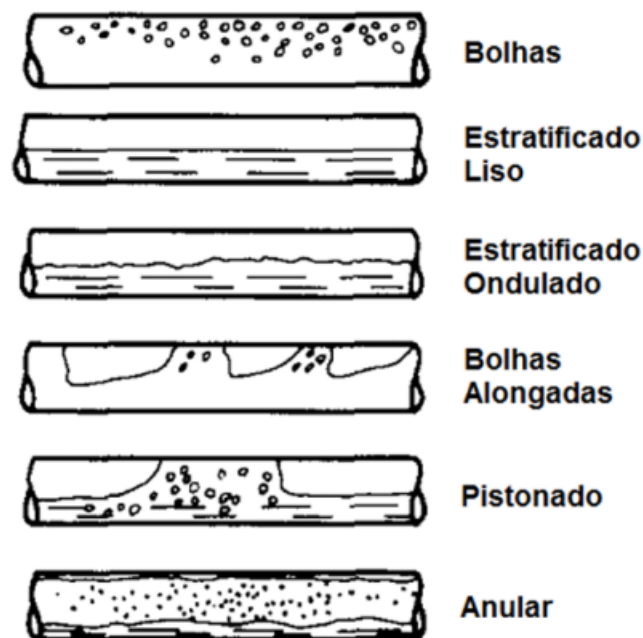


Figura 3 – Padrões para um escoamento gás-líquido horizontal. (CASTRO, 2013)

O padrão estratificado ocorre quando as velocidades das fases são baixas, elas são separadas pela gravidade onde a fase líquida ocupa a parte inferior da tubulação e a fase gasosa ocupa a parte superior. Este padrão é dividido em dois: Estratificado liso, que a

interface entre o gás e o líquido é lisa, e estratificado ondulado, onde a velocidade do gás é um pouco maior que gera ondas na interface. (SHOHAM, 2005)

Os padrões pistonado e bolhas alongadas pertencem ao grupo intermitente, que é caracterizado pelo fluxo alternado de gás e líquido. O líquido é dominante na tubulação e é composto por uma camada que se move lentamente, acompanhada por pistonadas de líquido movendo-se rapidamente, região onde pode aparecer pequenas bolhas. O gás se apresenta por meio de grandes bolhas. Quando há uma baixa velocidade de gás o fluxo bifásico se torna mais suave e o padrão de bolhas alongadas aparece. Já quando a velocidade de gás é alta ocorre o padrão pistonado. (SHOHAM, 2005)

Quando a velocidade da fase gasosa é muito alta ocorre o padrão anular. A fase líquida forma uma parede fina em torno da tubulação e também surge bolhas líquidas ao longo do fluxo gasoso no centro da tubulação. este padrão ocorre na transição entre o estratificado ondulado e o pistonado. (SHOHAM, 2005)

O padrão de bolhas dispersas para um escoamento horizontal é semelhante ao escoamento vertical, onde é caracterizada por uma alta velocidade da fase líquida e a fase gasosa se apresenta por meio de pequenas bolhas imersas no meio líquido. (SHOHAM, 2005)

2.4 Mapas de Escoamento

Para a melhor previsão dos padrões de escoamento surgiram os chamados mapas de escoamento, que são gráficos geralmente plotados em escala log-log utilizando as velocidades superficiais das fases presentes. Estes mapas mostram o limite de transição entre cada padrão, porém não existe um modelo genérico pois as velocidades superficiais podem variar com diâmetro, viscosidade dos fluidos, pressão e atrito da tubulação. Vários autores desenvolveram mapas para diversas condições de escoamento, alguns serão apresentados a seguir.

Baker (1954) apresenta um dos primeiros mapas de escoamento horizontal através de dados de misturas ar-água e ar-óleo. A figura 4 mostra a carta proposta por Baker, seus eixos apresentam o fluxo mássico (G) corrigidos por um fator adimensional, ψ para o líquido e ϕ para o gás, os índices 1 e 2 representam líquido e gás, respectivamente.

Taitel e Dukler (1976) propuseram também um mapa de escoamento vertical utilizando o parâmetro de Martinelli (X , número adimensional para cálculos de queda de pressão bifásica e transferência de calor), o número de Froude do gás (Fr_G), o parâmetro T , que é uma relação entre o gradiente de pressão e as massas específicas, e o parâmetro K que é função do número de Froude do gás e do número de Reynolds do escoamento. A figura 5 apresenta o mapa de escoamento destes autores.

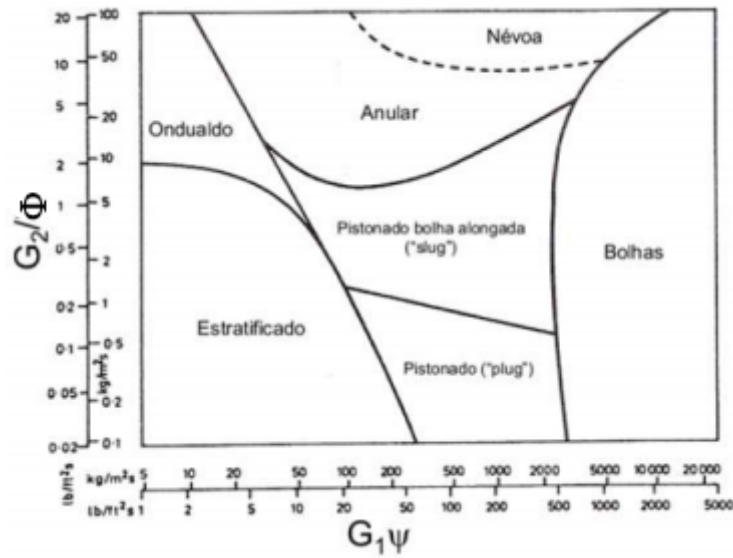


Figura 4 – Mapa de escoamento proposto por Baker. Adaptado de [Velez \(2016\)](#)

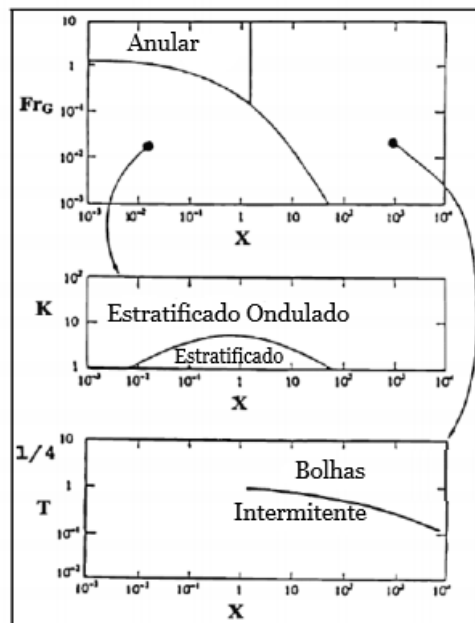


Figura 5 – Mapa de escoamento proposto por Taitel e Dukler. Adaptado de [Velez \(2016\)](#)

Uma dos mapas mais utilizadas é o proposto por [Mandhane \(1973\)](#) para escoamentos horizontais, que será utilizada como referência neste estudo para a determinação teórica dos padrões de escoamento. Foram realizadas aproximadamente 6 mil observações para elaborar esta carta com o diâmetro da tubulação variando de 0,5 a 6,5 polegadas e escoamento ar-água horizontal. O mapa foi plotado utilizando uma escala log-log e com os valores de velocidade superficial do líquido e do gás, respectivamente, nos eixos das ordenadas e abcissas. A figura 6 mostra o mapa proposto.

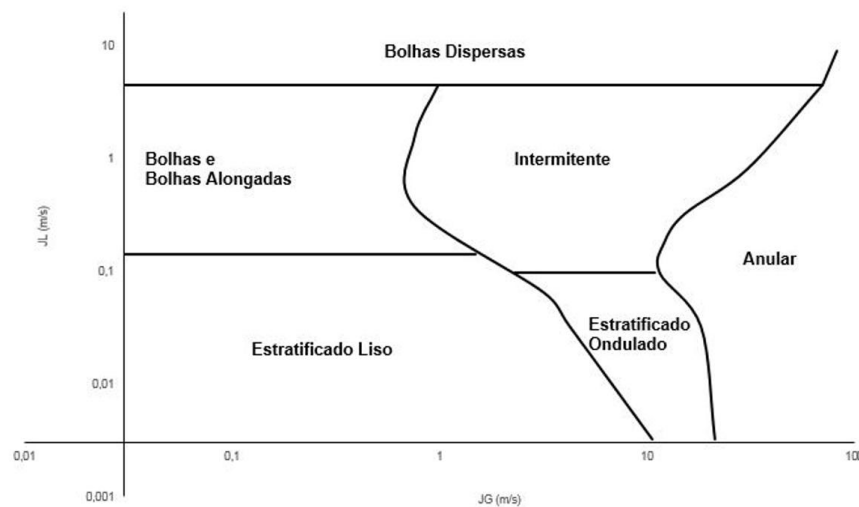


Figura 6 – Mapa de escoamento proposto por Mandhane.(ROCHA, 2019)

2.5 Modelos de Previsão de Gradiente de Pressão

Em um estudo completo de escoamento multifásico faz-se necessário o cálculo do gradiente de pressão ao longo da tubulação. Para este cálculo existem modelos matemáticos que possibilitam a previsão deste gradiente de pressão. Os modelos podem ser dinâmicos, que são modelos baseados em equações fundamentais da dinâmica dos fluidos (como por exemplo o modelo de dois fluidos), também podem ser modelos cinemáticos, que são modelos baseados tanto nas equações fundamentais como em correlações empíricas (modelo homogêneo, deslizamento e fases separadas), e os modelos empíricos, que são modelos que utilizam correlações totalmente empíricas (modelo de Beggs e Brill). (BRAGA, 2016)

O modelo homogêneo trata o escoamento multifásico como um pseudofluido, que utiliza a média das propriedades de cada fase nos cálculos, além de ser aplicada as equações para escoamento monofásico. Proposto por Wallis (1969) este método é muito utilizado e reconhecido como um método consolidado, porém não pode ser aplicado em todos os casos. Algumas considerações devem ser feitas para que seja possível a utilização do modelo homogêneo:

- Estado estacionário de escoamento monofásico.
- Sem deslizamento entre as fases.
- Ambas as fases são compressíveis.
- As duas fases estão misturadas e em equilíbrio.

- O título da mistura varia ao longo da tubulação.
- A área de seção da tubulação pode variar ao longo do escoamento.

Este modelo, além de considerar que a velocidade e temperatura das fases são iguais em qualquer ponto do escoamento, também considera que o *holdup in-situ* é o mesmo do *holdup* para a condição de não deslizamento entre as fases. A figura 7 apresenta um esquemático do modelo homogêneo. (SHOHAM, 2005)

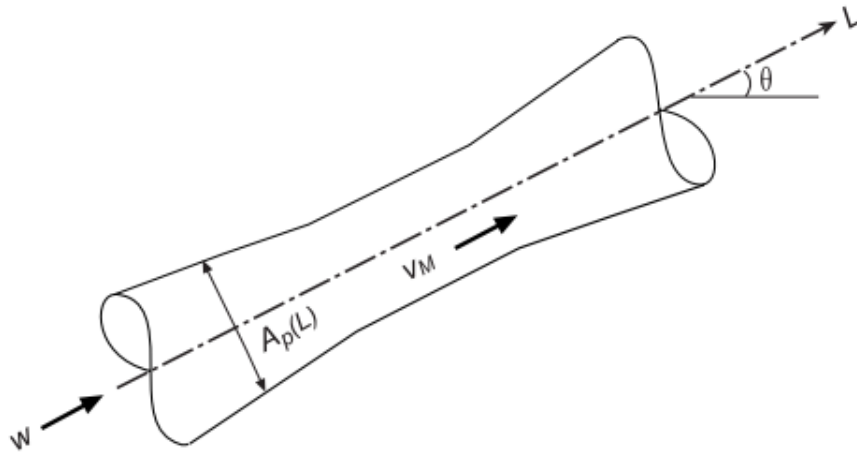


Figura 7 – Esquemático do modelo Homogêneo.(SHOHAM, 2005)

O modelo de deslizamento, formulado por Wallis (1969), possui um detalhamento maior para o que ocorre entre as fases ao levar em consideração o movimento relativo entre as mesmas. O deslizamento se dá pela diferença entre a velocidade das fases, tendo cada fase um perfil de velocidades. O modelo de deslizamento foi inicialmente para escoamentos gás-líquido vertical para os padrões de bolhas, pistonado e bolhas alongadas, porém atualmente é aplicado para qualquer tipo de escoamento bifásico.

De forma geral, o modelo de deslizamento é uma extensão do modelo homogêneo, tendo como principal diferença a consideração de que as fases escoam com a mesma velocidade no modelo homogêneo, e velocidades diferentes no modelo de deslizamento. (PROVENZANO, 2007)

O modelo de fases separadas considera que as propriedades de cada fase são diferentes, e é realizado através das equações de continuidade, momento e energia para cada uma das fases. Para este modelo assume-se que as fases escoam separadamente, cada uma ocupando uma parte da área de seção transversal da tubulação como mostra a figura 8. (WALLIS, 1969)

Para o fechamento do modelo são utilizadas correlações empíricas, a mais usual é a proposta por [Lockhart e Martinelli \(1949\)](#) em que o cálculo é realizado através do gradiente de pressão por meio das perdas friccionais em tubulações horizontais.

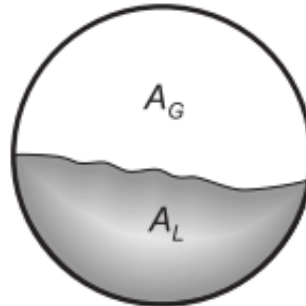


Figura 8 – Esquemático do modelo de fases separadas. ([SHOHAM, 2005](#))

O modelo de dois fluidos foi formulado por [Ishii \(1975\)](#), considerando cada fase separada para o equacionamento. Este modelo envolve três termos: dois blocos de equações (balanço de massa, momento e energia) para cada fase, e um bloco de condições envolvendo a fronteira interfacial que, pelo fato das fases não serem independentes, é importante para as equações de balanço. Desta forma o modelo de dois fluidos contém seis equações diferenciais de campo com três condições de contorno interfacial.

Esse modelo consegue descrever mudanças no escoamento e a interação entre as fases de uma forma mais detalhada do que os outros modelos, porém isto também significa que sua solução é mais complexa. Este modelo possibilita analisar de forma transiente o escoamento bem como propagações de onda e a mudança no padrão de escoamento. Entretanto, para aplicações práticas, quando as fases estão próximas a um equilíbrio térmico e mecânico este modelo apresenta desnecessárias complicações. ([ISHII; HIBIKI, 2011](#))

Uma correlação foi montada por [Beggs e Brill \(1973\)](#), a partir de dados empíricos, capaz de prever o gradiente de pressão e o holdup do líquido para um escoamento bifásico. Os dados foram obtidos através de uma tubulação de 27 metros de comprimento com um escoamento ar-água. Variou-se os parâmetros de velocidade do gás, velocidade do líquido, pressão externa do sistema, diâmetro do tubo, holdup do líquido, gradiente de pressão, ângulo de inclinação e padrão de escoamento.

Este modelo é um dos mais utilizados dentro dos modelos empíricos. Definindo-se o padrão de escoamento presente pode-se calcular os coeficientes necessários para o cálculo do holdup e do gradiente de pressão. ([BRAGA, 2016](#))

Para este trabalho será utilizado o modelo homogêneo e o modelo de Beggs e Brill. Os modelos foram escolhidos por serem modelos de simples modelagem e bem aplicáveis para os padrões de escoamento que ocorrem com baixa velocidade de gás e líquido, con-

siderando que a coleta de dados para a conclusão deste trabalho será por meio de uma bancada limitada de comprimento e velocidades de injeção de gás e líquido.

3 Metodologia

Neste capítulo apresenta-se o detalhamento matemático dos dois métodos que serão utilizados para o cálculo de gradiente de pressão do escoamento bifásico (modelo homogêneo e modelo de Beggs e Brill).

3.1 Modelo Homogêneo

A premissa deste modelo é de que o escoamento multifásico se comporta como o escoamento monofásico, onde as fases fluem com a mesma velocidade real (equação 2.14). Além disso, o escorregamento entre as fases é desprezado e os parâmetros de hold-up e perda de carga são obtidos a partir das propriedades médias dos fluidos. (WALLIS, 1969)

O modelo homogêneo é baseado na equação integral do teorema de transporte de Reynolds, que trata da relação fundamental de uma propriedade extensiva de um sistema e as variações dessa propriedade quando relacionada a um volume de controle. (FOX, 2006)

$$\frac{DN}{Dt}|_{sist} = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} \beta \rho \, dV + \int_{SC} \beta \rho \vec{V} \vec{n} \, dA \quad (3.1)$$

Sendo que N é uma propriedade extensiva e β uma propriedade intensiva, dado por:

$$\beta = \frac{\delta N}{\delta m} \quad (3.2)$$

3.1.1 Balanço de Massa

Realizando o balanço de massa, onde a propriedade extensiva será a massa ($N = m$), a eq. 3.2 se torna:

$$\beta = \frac{\delta m}{\delta m} = 1 \quad (3.3)$$

Considerando um escoamento em regime estacionário, que não há nenhum criador de massa no sistema, que a massa específica considerada é a da mistura e que a área de seção é constante:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} \rho_m \, dV = 0 \quad (3.4)$$

$$\left. \frac{Dm}{Dt} \right|_{\text{sis}} = 0 \quad (3.5)$$

Aplicando as equações 3.3, 3.4 e 3.5 a equação 3.1 se torna:

$$\int_{SC} \rho_m \vec{V} \vec{n} dA = 0 \quad (3.6)$$

Considerando o índice 1 as entradas da superfície de controle e o índice 2 como as saídas, resolve-se a integral da equação acima para um caminho fechado de 1 para 2:

$$\rho_{m2} \vec{V}_2 A_2 - \rho_{m1} \vec{V}_1 A_1 = 0 \quad (3.7)$$

$$\rho_{m2} W_2 = \rho_{m1} W_1 \quad (3.8)$$

Para um escoamento incompressível (as variações na massa específica são desprezíveis, $\rho = \text{constante}$) o balanço de massa é definido por:

$$W_1 = W_2 = W \quad (3.9)$$

3.1.2 Massa Específica da Mistura

Para os modelos que serão apresentados neste capítulo, será necessário o cálculo da massa específica da mistura. Sabendo que a massa específica é dada pela soma da razão entre massa e volume de cada fase podemos arranjar a equação da seguinte forma:

$$\rho_m = \frac{m_l}{V} \cdot \frac{V_L}{V_L} + \frac{m_G}{V} \frac{V_G}{V_G} \quad (3.10)$$

De acordo com as definições mostradas na seção 2.2, a equação 3.10 se torna:

$$\rho_m = \rho_L H + \rho_G \alpha \quad (3.11)$$

Para o modelo homogêneo, assume-se que as fases escoam com a mesma velocidade:

$$V_L = V_G = \frac{J_L}{H} = \frac{J_G}{\alpha} \quad (3.12)$$

Relacionando a fração de vazio com a fração volumétrica de injeção:

$$\alpha = \frac{J_G}{J} = C \quad (3.13)$$

A fração volumétrica de injeção, definida na seção 2.2 é dada pela relação de vazões volumétricas, que pode ser escrita com a razão de fluxo mássico e massa específica:

$$C = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} = \frac{\frac{W_G}{\rho_G}}{\frac{W_G}{\rho_G} + \frac{W_L}{\rho_L}} \quad (3.14)$$

Pode-se multiplicar a equação 3.14 por $\frac{W}{W}$ para assim relacionar o título com a fração volumétrica de injeção.

$$C = \frac{\left(\frac{x}{\rho_G}\right)}{\left(\frac{x}{\rho_G}\right) + \left(\frac{1-x}{\rho_L}\right)} \quad (3.15)$$

Aplicando a equação 3.15 na equação 3.11:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1-x}{\rho_L} + \frac{x}{\rho_G} \quad (3.16)$$

3.1.3 Equação da Quantidade de Movimento

Também partindo do teorema de transporte de Reynolds (equação 3.1), a equação da quantidade de movimento é a formulação de volume de controle da segunda lei de Newton e retorna a taxa com que a quantidade de movimento varia (somatório das forças externas). (FOX, 2006)

$$\beta = \frac{\delta \vec{P}}{\delta m} = \frac{\delta(m\vec{V})}{\delta m} = \vec{V} \quad (3.17)$$

$$\frac{D\vec{P}}{Dt}|_{sist} = \sum F_{ext} \quad (3.18)$$

As forças externas podem ser definidas como força de campo (F_{campo}) e força de superfície (F_{sup}). Nesse sentido, a equação de quantidade de movimento se torna:

$$F_{campo} + F_{sup} = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} \vec{V} \rho_m dV + \int_{SC} \vec{V} \rho \vec{V} \vec{n} dA \quad (3.19)$$

As forças de superfície são as forças oriundas da pressão e da tensão cisalhante, e a força de campo é oriunda da gravidade.

$$F_{sup} = -\frac{dp}{dz} - \tau_w S \quad (3.20)$$

$$F_{campo} = -\rho_m A g \sin(\theta) \quad (3.21)$$

Onde θ é o ângulo de inclinação da tubulação.

Considerando o escoamento em regime estacionário, a equação 3.19 se torna:

$$-\rho_m A g \sin(\theta) - \frac{dp}{dz} - \tau_w S = \int_{SC} \vec{V} \rho \vec{V} \vec{n} dA \quad (3.22)$$

Resolvendo a integral, temos:

$$\int_{SC} \vec{V} \rho \vec{V} \vec{n} dA = V \frac{d}{dz} (\rho_m V A) \quad (3.23)$$

Para uma área de seção transversal constante, e considerando um escoamento incompressível, a equação da quantidade de movimento fica expressa por:

$$-\rho_m A g \sin(\theta) - \frac{dp}{dz} - \tau_w S = V \rho_m A \frac{d}{dz} (V) \quad (3.24)$$

$$-\rho_m A g \sin(\theta) - \frac{dp}{dz} - \tau_w S = W \frac{dV}{dz} \quad (3.25)$$

$$-\frac{dp}{dz} = \tau_w \frac{S}{A} + \frac{W}{A} \frac{dV}{dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.26)$$

A equação 3.26 apresenta três termos de pressão: friccional, aceleracional e gravitacional, respectivamente. Nesse sentido, busca-se a seguir determinar os métodos de cálculo para estes termos.

3.1.4 Componente Friccional

O modelo homogêneo utiliza a relação entre o fator de atrito de Darcy (f_d) e o de Fanning (f_F) para definir o componente friccional de queda de pressão. (SHOHAM, 2005)

$$f_d = 4f_F \quad (3.27)$$

A partir desta relação, utiliza-se a equação de tensão cisalhante de Fanning:

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_F \rho_m J^2 \quad (3.28)$$

Substituindo a equação 3.27 em 3.28:

$$\tau_w = \frac{1}{8} f_d \rho_m J^2 \quad (3.29)$$

Com estas definições e definindo o perímetro (S) como uma relação entre área de seção e diâmetro interno, o componente friccional da queda de pressão se torna:

$$S = 4 \frac{A}{D} \quad (3.30)$$

$$\tau_w \frac{S}{A} = \frac{f_d \rho_m J^2}{2D} \quad (3.31)$$

Utilizando a equação 2.17, a equação se reduz a:

$$\tau_w \frac{S}{A} = \frac{f_d G^2}{2 D \rho_m} \quad (3.32)$$

As equações 3.33 e 3.34 descrevem formas de cálculo de fator de atrito para escoamento em regime laminar e turbulento, respectivamente, onde k_r é a rugosidade da tubulação.

$$f_d = \frac{64}{Re} \quad (3.33)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_r}{3,70D} - \frac{5,16}{Re} \log \left(\frac{k_r}{3,70D} + \frac{5,09}{Re^{0,87}} \right) \right) \quad (3.34)$$

3.1.5 Componente Aceleracional

Para o cálculo do componente aceleracional da queda de pressão reorganiza-se o trecho de interesse da equação 3.26 em função do fluxo mássico:

$$\frac{W}{A} \frac{dV}{dz} = G \frac{d(\frac{W}{\rho_m A})}{dz} \quad (3.35)$$

Analisando a derivada da equação anterior, observa-se que somente a vazão mássica (W) não é dependente do deslocamento em z, portanto pode-se reescreve-la da seguinte forma:

$$\frac{W}{A} \frac{dV}{dz} = G \frac{W}{A} \frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dz} + G \frac{W}{\rho_m} \frac{d(\frac{1}{A})}{dz} \quad (3.36)$$

Pode-se então aplicar a propriedade da derivada do quociente na derivada que envolve a área:

$$\frac{d(\frac{1}{A})}{dz} = -\frac{1}{A^2} \frac{dA}{dz} \quad (3.37)$$

Para a derivada que envolve a massa específica da mistura ($\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dz}$) utiliza-se a relação entre título e pressão, pois a variação da massa específica ocorre com a variação do título ou da pressão.

$$\rho_m = \rho_m(x, p) \quad (3.38)$$

$$\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dz} = \frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dx} \frac{dx}{dz} + \frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dp} \frac{dp}{dz} \quad (3.39)$$

Utilizando a equação 3.16 na derivada em relação ao título, temos:

$$\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dx} = \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \quad (3.40)$$

Para a derivada em relação à pressão, utiliza-se a regra do quociente:

$$\frac{d(\frac{1}{\rho_m})}{dp} = -\frac{1}{\rho_m^2} \frac{d(\rho_m)}{dp} \quad (3.41)$$

Portanto pode-se definir o componente friccional substituindo as equações 3.39, 3.40 e 3.41 em 3.36:

$$\frac{W}{A} \frac{dV}{dz} = G \frac{W}{A} \left[\left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - \frac{1}{\rho_m^2} \frac{d(\rho_m)}{dp} \frac{dp}{dz} \right] - G \frac{W}{\rho_m} \frac{1}{A^2} \frac{dA}{dz} \quad (3.42)$$

$$\frac{W}{A} \frac{dV}{dz} = G^2 \left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - G^2 \frac{1}{\rho_m^2} \frac{d(\rho_m)}{dp} \frac{dp}{dz} - \frac{G^2}{A} \frac{dA}{\rho_m dz} \quad (3.43)$$

3.1.6 Modelagem Final

Com as definições dos componentes que fazem parte do cálculo de diferença de pressão para o modelo homogêneo, pode-se retornar à equação 3.26 substituindo os itens definidos nas duas ultimas seções:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{f_d G^2}{2 D \rho_m} + G^2 \left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - \frac{G^2}{\rho_m^2} \frac{d(\rho_m)}{dp} \frac{dp}{dz} - \frac{G^2}{A} \frac{dA}{\rho_m dz} + \rho_m g \sin(\theta) \quad (3.44)$$

Na equação 3.44 o gradiente de pressão total aparece em ambos os lados, portanto é possível isolá-lo. Também pode-se utilizar a definição de velocidade do som na mistura (c_m) e número de Mach (Ma) para simplificar a equação e chegar ao resultado final de gradiente de pressão para o modelo homogêneo. (SHOHAM, 2005)

$$c_m = \left(\frac{d\rho_m}{dp} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{c_m^2} = \rho_m \left(\frac{1-c}{\rho_L + c_L^2} + \frac{1-c}{\rho_G + c_G^2} \right) \quad (3.46)$$

$$Ma = \frac{J}{c_m} \quad (3.47)$$

Substituindo as equações 3.45, 3.47 e 2.18 na equação 3.44, o gradiente de pressão fica expresso por:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\left(\frac{f_d}{2D} \frac{G^2}{\rho_m} \right) + G^2 \left(\frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) \frac{dx}{dz} - \left(\frac{G^2}{A \rho_m} \frac{dA}{dz} \right) + (\rho_m g \sin(\theta))}{1 + Ma^2} \quad (3.48)$$

3.2 Modelo de Beggs e Brill

O modelo empírico de Beggs e Brill (1973), assim como no modelo homogêneo, tem seu gradiente de pressão descrito através de três componentes:

$$-\frac{dP}{dz} = \left(\frac{\delta p}{\delta z} \right)_{el} + \left(\frac{\delta p}{\delta z} \right)_{ace} + \left(\frac{\delta p}{\delta z} \right)_f \quad (3.49)$$

A seguir mostra-se a definição de cada componente no gradiente de pressão:

3.2.1 Componente Friccional

O gradiente de pressão friccional para este modelo é definido baseado na equação 3.31.

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z} \right)_f = \frac{f \rho_m J^2}{2D} = \frac{f G J}{2D} \quad (3.50)$$

Onde a massa específica da mistura é a mesma adotada no modelo anterior, expressa na equação 3.16.

3.2.2 Componente Aceleracional

O componente aceleracional é o gradiente de pressão relacionado a variação de velocidade ao longo do escoamento. Baseada na equação 3.35 considera-se a velocidade superficial (J) e a relação da vazão mássica com a massa específica (equação 2.2).

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z} \right)_{ac} = \rho_m J \frac{dJ}{dz} \quad (3.51)$$

Por definição $G = J\rho$ e $J = J_G + J_L$:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z}\right)_{ac} = \rho_m J \left(\frac{d}{dz} \left(\frac{G_L}{\rho_L} \right) + \frac{d}{dz} \left(\frac{G_G}{\rho_G} \right) \right) \quad (3.52)$$

Fazendo uma análise das massas específicas, temos que $\rho_G \ll \rho_L$, portanto:

$$\frac{G_L}{\rho_L} \ll \frac{G_G}{\rho_G} \quad (3.53)$$

Portanto a equação 3.52 se torna:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z}\right)_{ac} = \rho_m J \left(\frac{d}{dz} \left(\frac{G_G}{\rho_G} \right) \right) \quad (3.54)$$

Expandindo a derivada presente na equação 3.54:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z}\right)_{ac} = \rho_m J \left(\frac{d(G_G)}{dz} \left(\frac{1}{\rho_G} \right) - \frac{d(\rho_G)}{dz} \left(\frac{G_G}{\rho_G^2} \right) \right) \quad (3.55)$$

Assumindo que variação do fluxo mássico do gás ao longo do escoamento é desprezível é muito menor que a variação da massa específica do gás ao longo do escoamento, ou seja:

$$\frac{d(G_G)}{dz} \ll \frac{d(\rho_G)}{dz} \quad (3.56)$$

Então a equação 3.55 se reduz a:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z}\right)_{ac} = -\rho_m J \left(\frac{G_G}{\rho_G^2} \right) \frac{d(\rho_G)}{dz} \quad (3.57)$$

Para solucionar a derivada da massa específica do gás em relação ao comprimento da tubulação utiliza-se a equação 3.58.

$$\rho_G = \frac{pM}{Z_G RT} \quad (3.58)$$

Utilizando esta definição e resolvendo a derivada em questão:

$$\frac{d(\rho_G)}{dz} = \rho_G \left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dz} + \frac{1}{M} \frac{dM}{dz} - \frac{1}{Z_G} \frac{d(Z_G)}{dz} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} \right) \quad (3.59)$$

Mais uma vez realizando uma análise de ordem de grandezas observa-se que da equação anterior apenas a pressão sofre variação significativa de seu valor durante o escoamento, portanto a equação 3.59 se reduz apenas ao termo de pressão. Com isso o componente aceleracional do gradiente de pressão para o modelo de Beggs e Brill é expresso por:

$$\left(\frac{\delta p}{\delta z}\right)_{ac} = -\rho_m J \left(\frac{J_G}{\rho_G}\right) \frac{dp}{dz} \quad (3.60)$$

3.2.3 Gradiente de Pressão Final

Com os componentes definidos nas equações 3.21, 3.50 e 3.60, o gradiente de pressão total dado a partir da equação 3.49, para o modelo de Beggs e Brill é expresso por:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\left(\frac{f\rho_m J^2}{2D}\right) + \rho_m g \sin(\theta)}{1 - E_k} \quad (3.61)$$

Onde E_k é definido por:

$$E_k = \frac{J J_g \rho_m}{p} \quad (3.62)$$

Para o cálculo deste gradiente se faz necessário definir o padrão de escoamento do fluxo para obter os coeficientes apropriados para o cálculo das frações volumétricas de cada fase. A seguir é demonstrado como Beggs e Brill sugerem estes cálculos.

3.2.4 Definição do Padrão de Escoamento

Como definido anteriormente (equações 2.7 e 2.8) a fração volumétrica do líquido determina a quantidade do componente líquido na mistura (*Holdup*) e a fração volumétrica do gás determina a quantidade do componente gasoso na mistura (fração de vazio).

A partir destas frações calcula-se quatro coeficientes (L_1, L_2, L_3, L_4) que juntamente com o número de Froude (equação 2.23) são capazes de determinar qual é o padrão do escoamento.

$$L_1 = 316H^{0,302} \quad (3.63)$$

$$L_2 = 0,0009252H^{-2,4684} \quad (3.64)$$

$$L_3 = 0,1H^{-1,4516} \quad (3.65)$$

$$L_4 = 0,5H^{-6,738} \quad (3.66)$$

Define-se então o padrão de escoamento a partir das seguintes condições:

- Padrão segregado:

$$H < 0,01 \text{ e } Fr < L_1 \text{ ou } H \geq 0,01 \text{ e } Fr < L_2$$

- Padrão de transição:

$$H \geq 0,01 \text{ e } L_2 < Fr \leq L_3$$

- Padrão intermitente:

$$0,01 \leq H < 0,4 \text{ e } L_3 < Fr \leq L_1 \text{ ou } H \geq 0,4 \text{ e } L_3 < Fr \leq L_4$$

- Padrão Disperso:

$$H \geq 0,4 \text{ e } Fr > L_4 \text{ ou } H < 0,4 \text{ e } Fr \geq L_1$$

3.2.5 Correlação para o *Holdup*

Considerando uma tubulação inclinada o *holdup* apresenta valores diferentes quando comparado a uma tubulação horizontal (inclinação = 0°). Isto ocorre devido ao efeito da gravidade, tomando como exemplo um escoamento com vazão constante: Quando o escoamento está ascendente a velocidade do líquido diminui em relação ao do gás, aumentando assim sua fração volumétrica. Já quando o escoamento está descendente a velocidade do líquido aumenta em relação a velocidade do gás e seu *holdup* diminui. A figura 9 demonstra a mudança no *holdup* para diversos ângulos de inclinação.

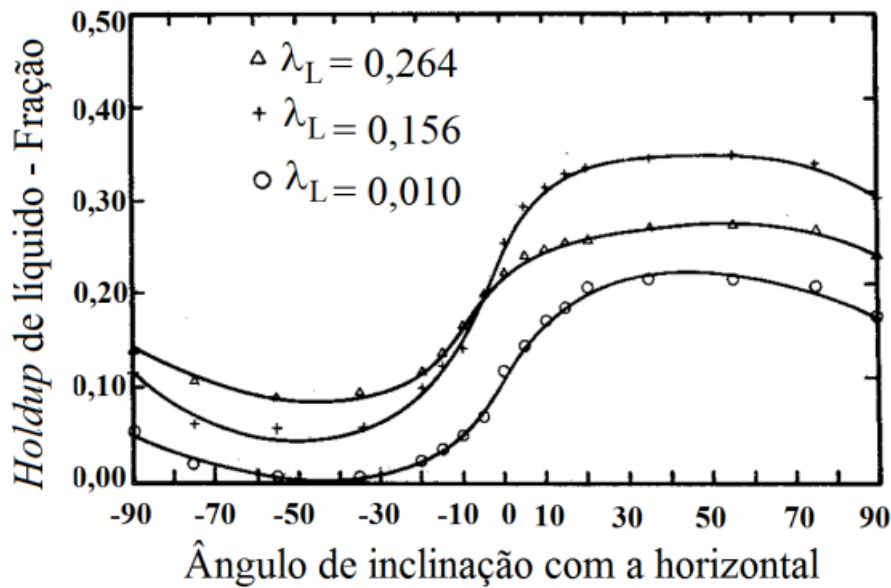


Figura 9 – *Holdup* e ângulo. (GUEDES, 2015)

Portanto utiliza-se um fator de correção para o cálculo do *holdup* que relaciona o *holdup* para a tubulação horizontal e o *holdup* para a tubulação inclinada.

$$\psi = \frac{H_{(\theta)}}{H_{(0)}} \quad (3.67)$$

Calcula-se então o *holdup* para a tubulação horizontal e o fator de correção ψ obter o *holdup* para a tubulação inclinada. Para estes cálculos utiliza-se o número de Froude, definido na equação 2.23 e coeficientes mostrados na tabela 1.

$$H_{(0)} = a\lambda_L^b Fr^c \quad (3.68)$$

Tabela 1 – Coeficientes para o cálculo do *holdup*. (GUEDES, 2015)

Padrão de Escoamento	a	b	c
Distribuído	1,065	0,5824	-0,0609
Intermitente	0,845	0,5351	-0,0173
Segregado	0,980	0,4846	-0,0868

Então, calcula-se o fator de correção da inclinação utilizando os dados da tabela 2, o número de velocidade do líquido (N_{Lv}) e a tensão superficial do líquido (σ_L).

$$E = (1 - \lambda_L) \ln(e\lambda_L^f Fr^g N_{Lv}^h) \quad (3.69)$$

$$N_{Lv} = J_L \left(\frac{\rho_L}{g\sigma_L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.70)$$

Tabela 2 – Coeficientes para o cálculo do fator de correção. (GUEDES, 2015)

Padrão de Escoamento	e	f	g	h
Distribuído ascendente	Não há correção: $E = 0$; $\psi = 1$			
Intermitente ascendente	2,960	0,305	0,0978	-0,4473
Segregado ascendente	0,011	-3,768	-1,614	3,539
Todos, descendente	4,7	-0,3692	-0,5056	0,1244

Para o caso do padrão de transição deve-se interpolar o valor do *holdup* dos padrões segregado e intermitente.

$$H_{(\theta)_{Tr}} = B H_{(\theta)_{Seg}} + (1 - B) H_{(\theta)_{Int}} \quad (3.71)$$

$$B = \frac{L_3 - Fr}{L_3 - L_2} \quad (3.72)$$

Este trabalho será realizado com a tubulação na horizontal ($\theta = 0$).

3.2.6 Correlação para o Fator de Atrito

O fator de atrito bifásico para o modelo de Beggs e Brill (f_{tp} é dado em função da fração volumétrica do líquido com a condição de não deslizamento das fases, do holdup, e do fator de atrito para escoamentos monofásicos de fluidos newtonianos (equações 3.33 e 3.34).

$$f_{tp} = e^F f_d \quad (3.73)$$

Onde F é um fator de correção obtido da seguinte forma:

$$F = \frac{\ln(y)}{-0,0523 + 3,182 \ln(y) - 0,8725 \ln(y)^2 + 0,01853 \ln(y)^4} \quad (3.74)$$

$$y = \frac{\lambda_L}{H_{L(\theta)}^2} \quad (3.75)$$

A equação 3.74 é descontínua no intervalo de $1,0 < y < 1,2$, portanto para este intervalo o cálculo de F é expresso pela equação 3.76

$$F = \ln(2, 2y - 1, 2) \quad (3.76)$$

4 Desenvolvimento

Nesta seção serão apresentados os materiais utilizados para a construção da bancada experimental e o procedimento experimental para utilização da mesma. Também serão detalhados os dados utilizados para a aplicação dos modelos previstos e considerações realizadas para o estudo de caso.

4.1 Materiais

Uma bancada experimental foi construída no Laboratório de Termofluidos localizado na Universidade de Brasília - Campus Gama para a medição de parâmetros experimentais de escoamento multifásico. A situação de pandemia no ano de 2020 impossibilitou a coleta de dados da mesma, sendo necessário a utilização de dados oriundos de bibliografias para a realização deste trabalho.

A figura 10 apresenta um esquemático da bancada experimental.

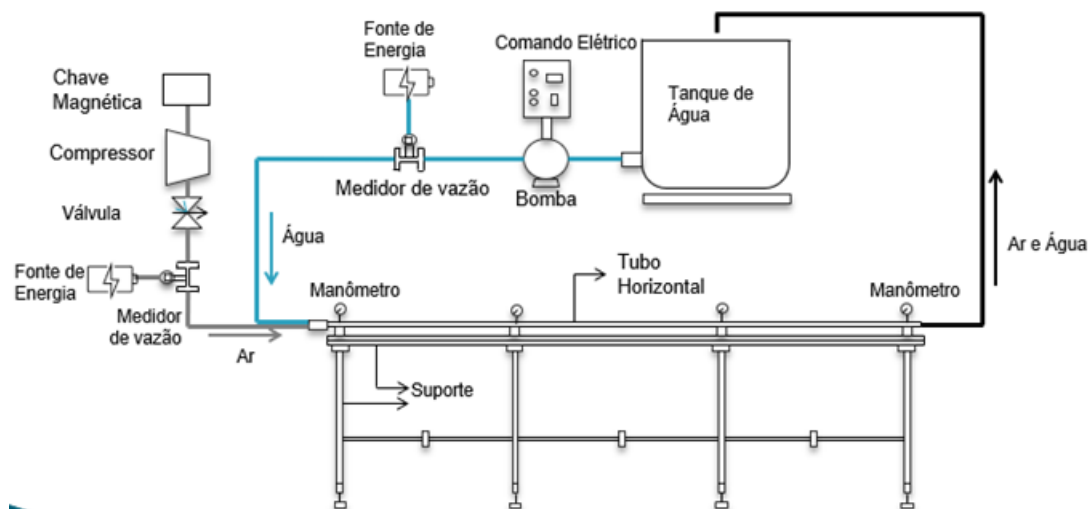


Figura 10 – Esquemático da Bancada experimental.

Um tanque armazena a água utilizada no processo, alimentando uma bomba com potência de 5 CV, da fabricante Schneider. Um medidor de vazão da fabricante Rucken é utilizado para monitoramento da vazão de água, antes da mesma ser inserida na tubulação. O sistema de ar é composto por um compressor da Chiaperini com pressão máxima de aproximadamente 1200 kPa e um medidor de vazão, também da fabricante Rucken. A entrada de ar será por meio de injetores na parte superior da tubulação, aproximadamente a 1 metro de distância da entrada de água. Ao final da tubulação o ar irá para o mesmo

tanque que a água, que estará aberto em sua parte superior para que o ar não recircule para a bomba.

A bancada foi projetada com uma tubulação de acrílico de 1 polegada de diâmetro interno e 6 metros de comprimento, com uma base rígida, pés para nivelamento e controle de vibração.

Os medidores de vazão funcionam através de um rotor que gira em uma velocidade proporcional a velocidade do fluido. Um sensor eletrônico coleta a velocidade de rotação do rotor e, através da área, o módulo eletrônico retorna a vazão do fluido. Os dados de pressão serão coletados através de manômetros conectados em diversos pontos da bancada. A figura 11 apresenta os componentes da bancada.



Figura 11 – Componentes da bancada experimental.

A primeira etapa da construção da bancada experimental foi a elaboração do desenho estrutural, no qual utilizou-se um perfil de alumínio que, juntamente com cantoneiras móveis ao longo do perfil, dão suporte para a tubulação de acrílico. O perfil é fixado em uma estrutura de ferro rígida para não permitir vibrações no sistema (figura 12).

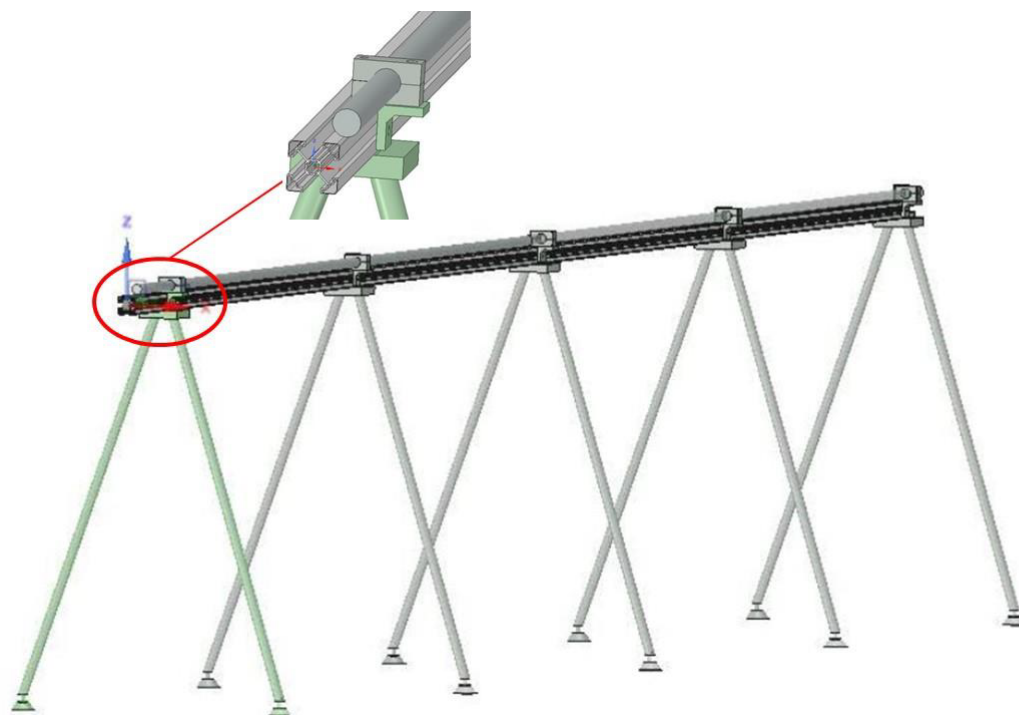


Figura 12 – Suporte da Bancada.

Com a estrutura pronta foi desenvolvido um sistema de conexão para o tubo de acrílico, que foi seccionado em 4 partes. A conexão é necessária para a inserção de bicos injetores de ar, e bicos para a medição de pressão ao longo da tubulação. Utilizou-se uma adaptação de Nylon (figura 13) com anel oring em suas extremidades para melhor vedação da conexão com o tubo de acrílico.

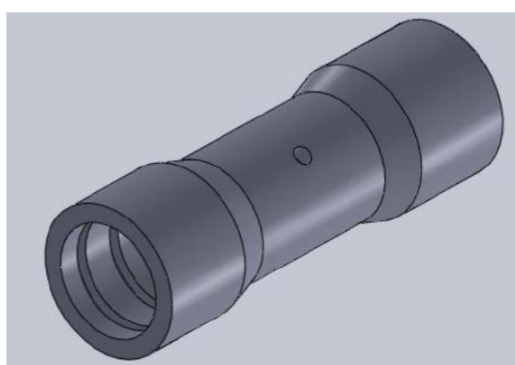


Figura 13 – Conexão de Nylon.

A conexão entre a motobomba e o reservatório/tubulação é feita através de tubos de policloreto de Vinila (PVC) e conta com uma válvula antes e outra a depois da bomba. A conexão do compressor com a tubulação é feita através de mangueiras flexíveis, e conta

com uma válvula para regulação de vazão antes da entrada na tubulação. A figura 14 apresenta a montagem final da bancada.



Figura 14 – Bancada de Escoamento Multifásico.

4.2 Procedimento Experimental

O roteiro experimental para a coleta de dados na bancada construída é:

- 1º - Enchimento do reservatório de água até $\frac{2}{3}$ de sua capacidade (mantendo a tampa superior do reservatório aberta).
- 2º - Ligar o disjuntor do sistema motobomba, localizado no quadro elétrico do laboratório
- 3º - Verificar as conexões do sistema de água, antes e depois da tubulação
- 4º - Abrir todas as válvulas do sistema de água
- 5º - Ligar o sistema motobomba com velocidade reduzida
- 6º - Após a operação nominal na velocidade anterior, ajustar o sistema motobomba para a velocidade desejada a fim de atingir um valor de vazão específico
- 7º - Verificar as conexões do sistema de ar, antes e depois da tubulação

- 8º - Abrir todas as válvulas do sistema de ar, sendo que a válvula após a saída do compressor, utilizada para regulação de vazão de ar, deve ser aberta parcialmente;
- 9º - Ligar o compressor, monitorando sempre a pressão no tanque;
- 10º - Ajustar a válvula de regulação de vazão de ar a fim de atingir a vazão desejada.
- 11º - Coletar os dados de vazão e pressão, repetindo o procedimento 5 vezes para cada medição
- 12º - Ao término das medições desliga-se o compressor e a bomba, respectivamente, bem como seus disjuntores no quadro elétrico do laboratório
- 13º - Fazer a limpeza do local, fechamento das válvulas e do reservatório

4.3 Dados Experimentais

A coleta de dados experimentais na bancada construída foi impossibilitada devido à acontecimentos fora do escopo do trabalho. Sendo assim, os dados utilizados para a análise do gradiente de pressão foram adquiridos através de um laboratório da Universidade de Campinas. Os dados foram utilizados como variáveis de entrada em um código computacional e, a partir a aplicação das equações desenvolvidas neste trabalho, foram gerados os resultados de gradiente de pressão. Como não se tratam de dados próprios, adotou-se uma análise de regressão linear para uma abordagem mais comportamental das variáveis.

A fonte de dados para este trabalho foi obtida através do Prof. Dr. Marcelo de Castro, professor da Universidade de Campinas e Diretor Associado do Centro de Estudos de Petróleo. Os dados da tabela 3 são de uma bancada horizontal (inclinação 0º) de escoamento bifásico ar-água, com 10 metros de comprimento e 0,052 metros de diâmetro interno. Foram disponibilizadas 11 medições de vazão de água e ar, *holdup*, pressão e gradiente de pressão. A tabela 4 apresenta os parâmetros dos fluidos utilizados.

4.4 Considerações para a Aplicação dos Modelos

Ao longo da execução dos cálculos para este trabalho foram feitas considerações para cada um dos modelos escolhidos. Esta seção apresenta as condições aplicadas nos modelos Homogêneo e de Beggs e Brill.

4.4.1 Modelo Homogêneo

Para a aplicação do modelo Homogêneo é considerado um regime estacionário, onde as propriedades dos fluidos não variam com o tempo. Também são desprezados os

Tabela 3 – Dados Experimentais. (Prof. Dr. Marcelo de Castro)

Pontos	W_L [kg/h]	W_G [kg/h]	<i>holdup</i>	δp [mbar]
1	5244,52	7,02	0,701	1,7869
2	5216,13	23,69	0,639	15,9050
3	9703,14	24,48	0,687	42,7135
4	9352,73	33,35	0,733	43,6330
5	9535,22	43,59	0,613	52,1786
6	14213,82	15,29	0,275	51,2977
7	19540,97	16,41	0,903	88,5410
8	19867,87	41,53	0,790	144,1580
9	34915,97	6,40	0,736	171,7970
10	3582,67	74,75	0,275	10,1735
11	49557,81	7,85	0,976	116,7660

Tabela 4 – Propriedades.

Massa Específica da Água [kg/m ³]	995
Massa Específica do Ar [kg/m ³]	1,225
Viscosidade Dinâmica da Água [Pa.s]	0,001
Viscosidade Dinâmica do Ar [Pa.s]	0,0000172
Velocidade do Som na Água [m/s]	340
Velocidade do Som no Ar [m/s]	1435
Rugosidade da Tubulação [m]	0,000005

efeitos térmicos atuantes sobre o sistema, ou seja, sem variação de temperatura ao longo do escoamento. Esta consideração é aplicada para o título da mistura:

$$\frac{dx}{dz} = 0 \quad (4.1)$$

O cálculo do número de Reynolds, considerando o Modelo Homogêneo, requer a determinação da viscosidade dinâmica da mistura (μ_m), que é dada pela equação 4.2. (SHOHAM, 2005)

$$\mu_m = \mu_L \alpha + \mu_G (\alpha - 1) \quad (4.2)$$

Quando α e H não puderem ser identificadas experimentalmente, utiliza-se a equação 4.3 válida para o modelo homogêneo. (SHOHAM, 2005)

$$\alpha = \frac{J_G}{J} \quad e \quad H = 1 - \alpha \quad (4.3)$$

No estudo de caso apresentado deste trabalho, a tubulação é totalmente horizontal e conta com a área de seção constante, portanto:

$$\frac{dA}{dz} = 0 \quad e \quad \theta = 0 \quad (4.4)$$

A partir das considerações expostas nessa seção e tomando como base a equação 3.48, o cálculo do gradiente de pressão para o modelo homogêneo em um escoamento bifásico horizontal ar-água se torna:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\left(\frac{f_d}{2} \frac{G^2}{D \rho_m}\right) + (\rho_m g \sin(\theta))}{1 + Ma^2} \quad (4.5)$$

4.4.2 Modelo de Beggs e Brill

No modelo de Beggs e Brill também aplica-se a condição de regime estacionário e sem transferência de calor. A viscosidade da mistura considerada é a mesma do modelo homogêneo (equação 4.2).

Por se tratar de um modelo empírico, faz-se necessário da pressão inicial. Os dados da tabela 5 apresenta a pressão em Pa. A tubulação é horizontal, portanto não é necessário nenhuma correção no *holdup*, conforme a seção 3.2.5, e seu cálculo é determinado pela equação 3.68.

Tabela 5 – Pressão Inicial. (Prof. Dr. Marcelo de Castro)

Pontos	Pressão [Pa]
1	3.040
2	6.900
3	19.240
4	22.420
5	27.060
6	25.630
7	44.470
8	72.690
9	87.560
10	10.860
11	171.550

Desta forma a equação 3.61 é a referência para cálculo do gradiente de pressão utilizando modelo de Beggs e Brill em um escoamento bifásico horizontal ar-água:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\left(\frac{f \rho_m J^2}{2D}\right) + \rho_m g \sin(\theta)}{1 - E_k} \quad (4.6)$$

Onde E_k é definido por:

$$E_k = \frac{J J_g \rho_m}{p} \quad (4.7)$$

5 Resultados

Para uma análise do escoamento multifásico recomenda-se primeiramente definir em qual padrão o escoamento se encontra, portanto foram utilizados os dados de velocidade para a elaboração do mapa de escoamento proposto por Mandhane. A figura 15 apresenta o mapa, no qual os pontos em azul representam cada uma das 11 medições.

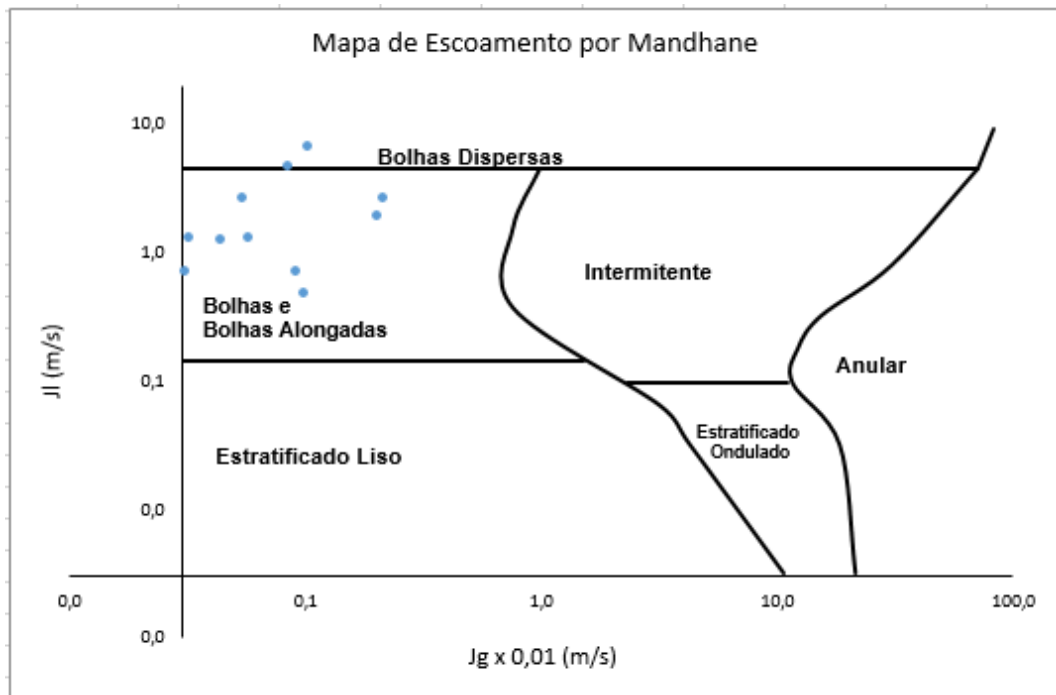


Figura 15 – Mapa de Escoamento Utilizando os Dados Experimentais

Observa-se que a velocidade do componente gasoso é muito pequena, sendo necessário o aumento de sua escala em 100 vezes para melhor visualização do padrão. As medições se encontram nos padrões de Bolhas e bolhas dispersas, caracterizadas por um baixo fluxo mássico do componente gasoso e alto fluxo mássico o do componente líquido, gerando bolhas de ar ao longo do escoamento predominantemente líquido.

Para a aplicação dos modelos de previsão de gradiente de pressão utilizando os dados experimentais elaborou-se um código em matlab. O código para o modelo homogêneo e de Beggs e Brill se encontram nos apêndices A e B, respectivamente. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através dos cálculos realizados.

5.1 Gradiente de Pressão - Modelo Homogêneo

A tabela 6 apresenta os resultados obtidos através da aplicação do modelo homogêneo para previsão do gradiente de pressão. A queda de pressão, expressa em milibar é a variável principal deste modelo calculada através da equação 4.5. Além da pressão, o *holdup* (H) também foi calculado através das considerações deste modelo (equação 4.3). As demais variáveis são definidas através de cálculos gerais para escoamento multifásico.

Tabela 6 – Resultados - Modelo Homogêneo

Pontos	dp [mbar]	Q [m^3/s]	J [m/s]	ρ_m [kg/m^3]	H	Re
1	4,366	0,003	1,439	477,299	0,479	67497,003
2	10,725	0,007	3,215	213,164	0,213	45089,255
3	19,881	0,008	3,889	327,137	0,328	97629,671
4	24,375	0,010	4,790	256,281	0,257	85374,007
5	30,917	0,013	5,908	212,076	0,212	82314,696
6	22,057	0,007	3,501	531,594	0,534	203536,428
7	33,414	0,009	4,321	592,018	0,594	319964,980
8	59,795	0,015	7,046	369,584	0,371	213012,003
9	50,948	0,011	5,273	866,218	0,870	1643085,999
10	22,638	0,018	8,452	56,598	0,056	26317,078
11	82,922	0,016	7,353	881,716	0,886	2608622,642

O número de Reynolds aponta que o escoamento é turbulento, regime no qual as partículas não apresentam um comportamento linear, é um comportamento aleatório, o que dificulta a análise de suas propriedades em relação a um escoamento linear ($Re < 2400$). Analisando a massa específica da mistura observa-se que ela é maior quando o fluxo mássico do componente gasoso diminui, e menor quando o fluxo mássico do componente gasoso aumenta, os pontos 9 e 10 evidenciam bem essa relação, de acordo com o ρ_m da tabela 6 e W_G da tabela 3. Isso acontece devido a grande diferença entre as massas específicas do componente líquido e componente gasoso.

Antes de analisar o comportamento do gradiente de pressão, pode-se observar as variações do *Holdup* calculado no modelo Homogêneo em relação a Velocidade Superficial dos componentes presentes no escoamento através da figura 16. Observa-se que, a partir da aplicação de uma regressão linear nos dados, o comportamento do *Holdup* calculado segue a teoria descrita nas seções iniciais deste trabalho: quanto maior o fluxo mássico do componente líquido, maior será o *Holdup*. Na seção 5.3 será realizada uma comparação dos valores de pressão e *Holdup* entre os dois modelos e os valores reais.

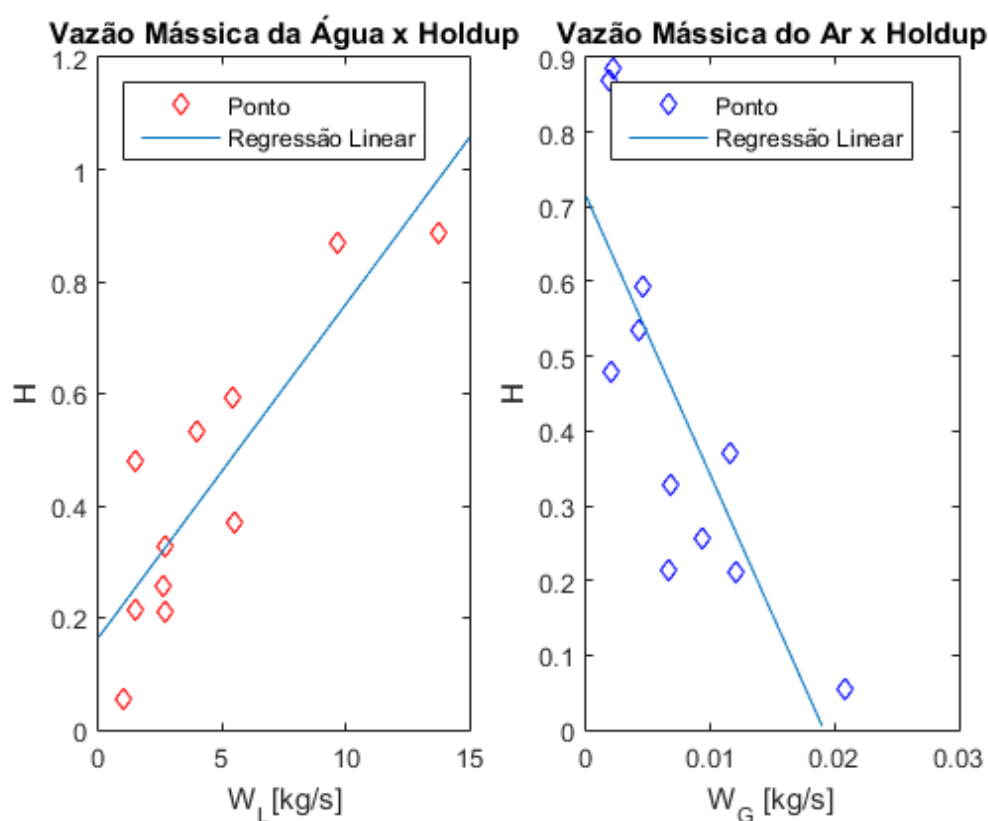


Figura 16 – Comportamento do Holdup no Modelo Homogêneo

Comparando os valores de vazões mássicas da tabela 3 com os valores de gradiente de pressão, observa-se que, quando há uma maior variação de fluxo mássico do componente líquido, ocorre também uma grande variação de pressão. Essa variação do componente líquido pode ser observada através do *Holdup*. A figura 17 apresenta o comportamento do gradiente de pressão em relação ao *Holdup*.

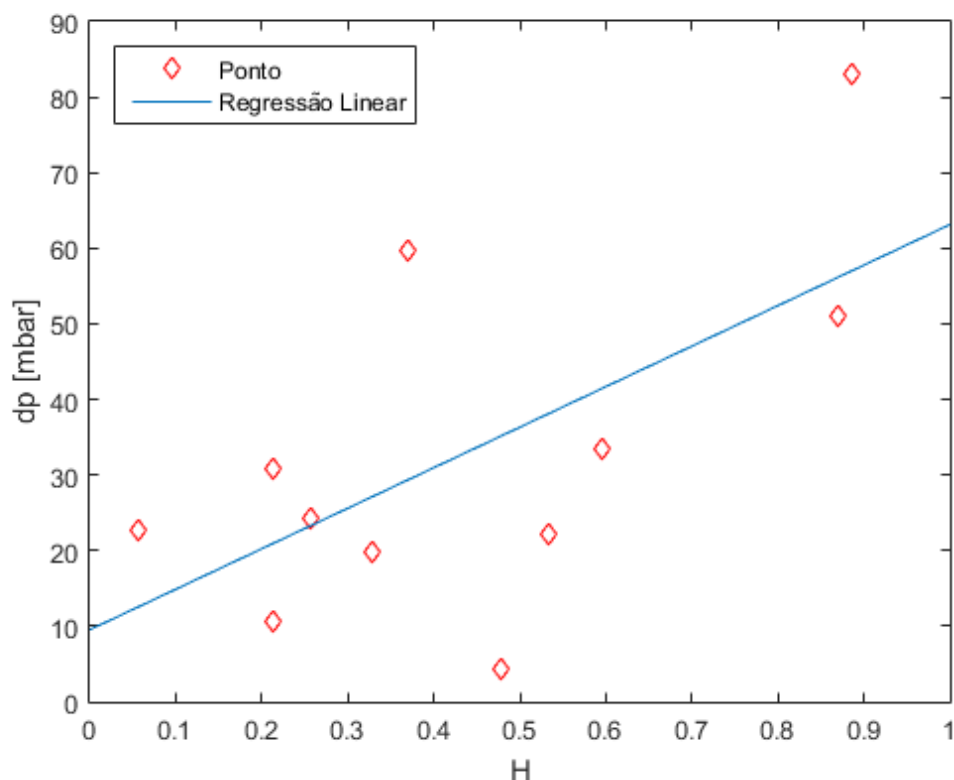


Figura 17 – Gradiente de Pressão x Holdup - Modelo Homogêneo

O gráfico aponta, através da aplicação de uma regressão linear, que os maiores valores de pressão ocorrem a medida em que o *Holdup* aumenta. Um *Holdup* alto indica que a fração do componente líquido ocupa maior parte na mistura. Pode-se afirmar que, para o modelo homogêneo nas condições apresentadas neste trabalho, o gradiente de pressão é inversamente proporcional à fração de vazio e diretamente proporcional ao *Holdup*.

5.2 Gradiente de Pressão - Modelo de Beggs e Brill

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos através da aplicação do modelo de Beggs e Brill para previsão do gradiente de pressão. A queda de pressão, expressa em milibar, foi calculada através da equação 3.61. As variáveis gerais da mistura como vazão, velocidade e massa específica são as mesmas do modelo anterior, calculadas através das equações apresentadas nas seções iniciais deste trabalho. Já para o cálculo de *Holdup* foi utilizada a correlação apresentada na seção 3.2.5 aplicada a um escoamento disperso.

A mesma análise realizada para o *holdup* calculado através do modelo Homogêneo pode ser replicada para o *holdup* calculado para o modelo de Beggs e Brill. A figura 18 apresenta a relação entre *holdup* e fluxo mássica do componente gasoso e do componente

Tabela 7 – Resultados - Modelo de Beggs e Brill

Pontos	dp [mbar]	Q [m^3/s]	J [m/s]	ρm [kg/m^3]	H
1	6,564	0,003	1,439	477,299	0,637
2	18,554	0,007	3,215	213,164	0,361
3	31,593	0,008	3,889	327,137	0,453
4	40,110	0,010	4,790	256,281	0,383
5	52,718	0,013	5,908	212,076	0,334
6	33,626	0,007	3,501	531,594	0,609
7	52,221	0,009	4,321	592,018	0,632
8	100,306	0,015	7,046	369,584	0,452
9	90,307	0,011	5,273	866,218	0,770
10	47,822	0,018	8,452	56,598	0,147
11	172,830	0,016	7,353	881,716	0,747

líquido. Observa-se que o aumento do componente líquido ocasiona no aumento do *holdup*, e o aumento do componente gasoso gera o decréscimo no mesmo.

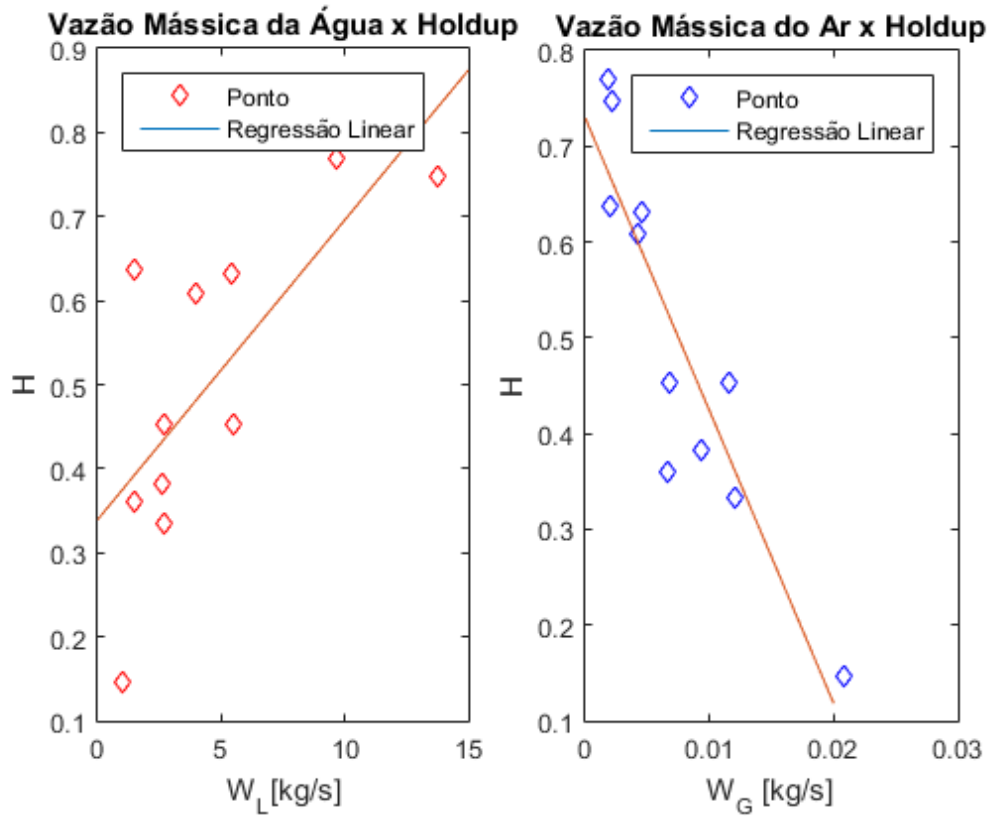


Figura 18 – Comportamento do Holdup no Modelo de Beggs e Brill

Analisando o gradiente de pressão, conforme a figura 19 observa-se um comportamento inverso do que o calculado no modelo homogêneo: A queda de pressão é menor com o aumento do *Holdup*. Pode-se afirmar que o gradiente de pressão para o modelo de Beggs e Brill, com as condições apresentadas nesse trabalho, é diretamente proporci-

onal ao *Holdup*, ou seja, quanto maior for a fração do componente líquido, maior será o gradiente de pressão.

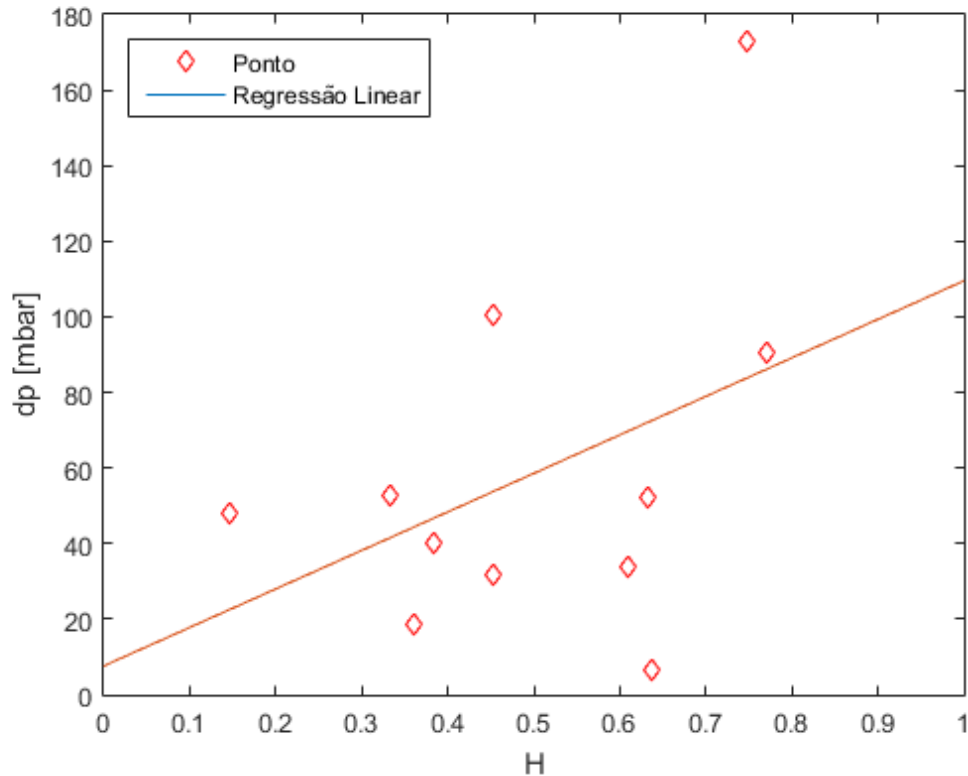


Figura 19 – Gradiente de Pressão x Holdup

5.3 Análise Comparativa

Nas últimas seções foram apresentados os resultados dos modelos de previsão de gradiente de pressão. Observa-se que em alguns pontos os valores de queda de pressão do modelo homogêneo ligeiramente menores do que os valores do modelo de Beggs e Brill que, por sua vez, estão abaixo dos valores reais. A figura 20 apresenta o comportamento de ambos os modelos com as medições reais de queda de pressão, e a diferença entre os resultados fica bem clara: A curva azul contém valores do modelo homogêneo, a curva verde do modelo de Beggs e Brill e a curva vermelha contém os dados experimentais. A divergência dos valores do modelo homogêneo era esperada, pois ele considera o escoamento multifásico como um escoamento monofásico com a média das propriedades de cada fase, além de que as vazões de entrada nos dados utilizados são pequenas, dificultando inclusive a definição do padrão de escoamento. Outros fatores que colaboraram para o resultado do gradiente de pressão neste modelo foram as considerações feitas para este estudo de caso, principalmente a variação do título da mistura que é um requisito do modelo e que não foi possível considera-lá devido a falta de acesso a este dado.

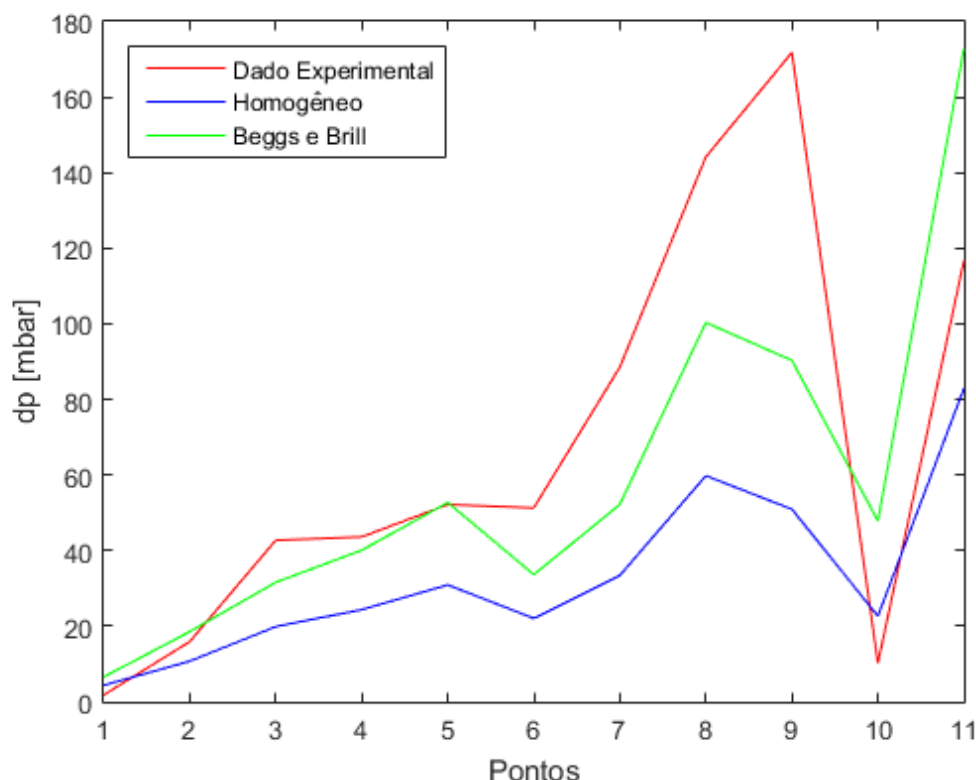


Figura 20 – Comportamento do Gradiente de Pressão.

Já o gradiente de pressão calculado através do modelo de Beggs e Brill apresentaram resultados mais próximos dos resultados reais, exceto na 11^a medição. Essa proximidade maior com os resultados reais (em relação aos dados do modelo homogêneo) era esperada por se tratar de um modelo empírico, tendo como uma das variáveis de entrada a pressão inicial. Outro aspecto importante é que o modelo foi criado a partir de um escoamento ar-água, o mesmo que foi aplicado neste trabalho. A tabela 8 mostra a diferença, em porcentagem, dos valores obtidos através dos dois modelos. Observa-se que a maior diferença entre o modelo de Beggs e Brill e os dados medidos é na décima medição, onde há maior presença do componente gasoso na mistura. Já o modelo homogêneo tem seu valor mais distante que o resultado experimental na primeira medição.

Em linhas gerais o comportamento do modelo de Beggs e Brill é mais próximo aos dados medidos do que em relação ao modelo Homogêneo, apesar do modelo de Beggs e Brill apresentar, no décimo ponto, o maior percentual de diferença. Essa análise pode ser comprovada visualizando a figura 20. Observa-se também que o menor percentual de diferença (1%) ocorre no quinto ponto, quando aplicado o modelo de Beggs e Brill.

Para o cálculo do *Holdup* utilizou-se a fórmula sugerida em cada modelo de previsão de gradiente de pressão. A figura 21 apresenta um gráfico comparativo entre o resultado do *Holdup* medido e o calculado através dos modelos. Observa-se que em alguns pontos os

Tabela 8 – Resultados - Gradientes de Pressão em mbar

Experimental	Beggs e Brill	Homogêneo
1,787	6,564	4,366
15,905	18,554	10,725
42,714	31,593	19,881
43,633	40,110	24,375
52,179	52,718	30,917
51,298	33,626	22,057
88,541	52,221	33,414
144,158	100,306	59,795
171,797	90,307	50,948
10,174	47,822	22,638
116,766	172,830	82,922

modelos obtiveram resultados próximos, como nos pontos 9, 10 e 11. Porém nos demais pontos a distância entre os resultados é expressiva, por se tratar de uma variável com valores entre 0 e 1.

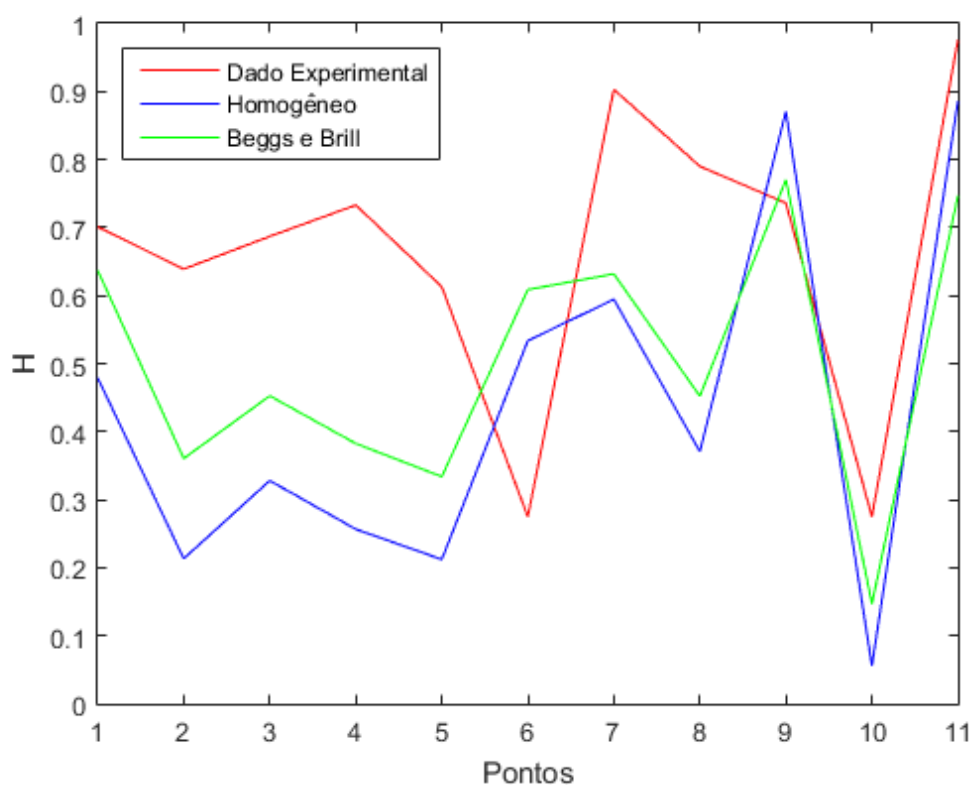


Figura 21 – Comparativo do Holdup.

Os resultados estão dentro do esperado, pois o cálculo do *Holdup*, por definição, envolve a área ocupada pelo líquido que é uma variável difícil de ser medida quando se trata de um escoamento multifásico. Os pontos com maior proximidade nos valores são os

que apresentam altos valores de vazão mássica do componente líquido (9 e 10 conforme a tabela 3) ou altos valores de vazão mássica do componente gasoso (11). Podemos então afirmar que, com as condições apresentadas neste trabalho, quanto maior for a vazão mássica de ambos os componentes presentes em um escoamento bifásico ar-água, mais preciso será o cálculo do *Holdup* através dos modelos de Beggs e Brill e Homogêneo.

Por fim, a figura 22 apresenta o comportamento da queda de pressão medida com o *Holdup* medido. Comparando com as figuras 17 e 19 vemos que as três possuem o mesmo comportamento, sendo diretamente proporcional ao *Holdup*. Sendo assim, a aplicação dos modelos Homogêneo e de Beggs e Brill, sob as condições apresentadas neste trabalho, apresentaram resultados satisfatórios, levando em consideração que são modelos teóricos para um escoamento multifásico, que contém alta complexidade de análise.

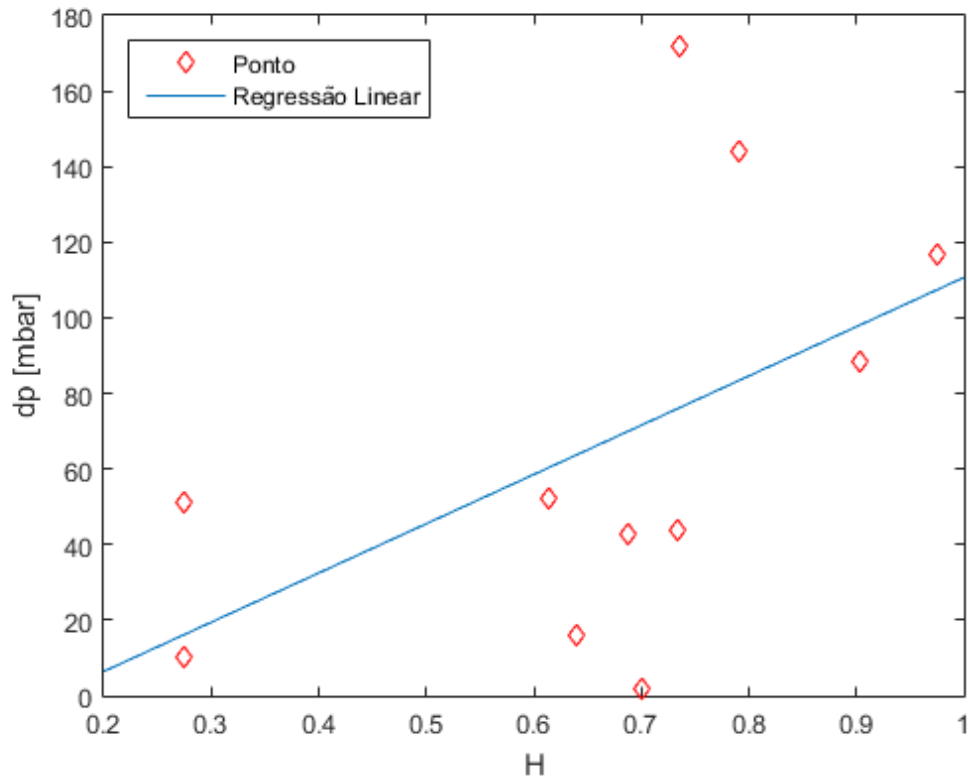


Figura 22 – Gradiente de Pressão x Holdup

6 Conclusão

Este trabalho buscou analisar dois modelos de gradiente de pressão para um escoamento bifásico horizontal ar-água, realizando um comparativo com dados experimentais. Destaca-se a importância do estudo para a Engenharia de Energia, tendo em vista que a principal atribuição de um Engenheiro de Energia é supervisionar e gerenciar processos que envolvam consumo e/ou geração de qualquer forma de energia. Foram apresentados os conceitos básicos de escoamento multifásico como a definição das fases envolvidas, velocidades superficiais, *Holdup* e em especial os padrões de escoamento, que são as formas em que as fases estão dispostas espacialmente. Os padrões de escoamento podem ser definidos por meio de diversos mapas elaborados por autores, como o mapa proposto por [Mandhane \(1973\)](#).

Foram detalhados matematicamente dois modelos de cálculo de gradiente de pressão para um escoamento multifásico: Homogêneo e Beggs e Brill. O Modelo homogêneo assume que as fases fluem com a mesma velocidade real, tendo como premissa que o escoamento multifásico se comporta como um monofásico. Baseado na equação integral do teorema de transporte de Reynolds é um modelo teórico bastante utilizado nas bibliografias relacionadas, porém com pouca precisão em seus resultados. Já o modelo de Beggs e Brill se trata de um modelo construído também a partir do teorema de transporte de Reynolds, porém complementado por dados experimentais. Além do gradiente de pressão, o modelo de Beggs e Brill também apresenta uma correlação para o cálculo do *Holdup*.

Para a análise destes dois modelos apresentados foi construída uma bancada experimental de escoamento multifásico, com uma tubulação de 6 metros de comprimento e com um sistema de bombeamento de água e compressão de ar. Devido à acontecimentos fora do escopo do trabalho foi impossibilitada a utilização da bancada construída para a coleta de dados experimentais, portanto os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos pelo Prof. Dr. Marcelo de Castro, da Universidade de Campinas. Utilizou-se 11 medições de uma bancada de testes de escoamento bifásico ar-água, com 10 metros de comprimento para a análise dos modelos de previsão de gradiente de pressão.

Utilizando o mapa proposto por Mandhane, constatou-se que os dados utilizados estão em sua maioria no padrão de bolhas e bolhas alongadas, com algumas medições no padrão de bolhas dispersas. Estes padrões são caracterizados por baixa velocidade superficial do gás e alta velocidade superficial do componente líquido. Na análise do modelo Homogêneo observou-se que o escoamento se encontra no regime turbulento e que a massa específica da mistura aumenta quando o fluxo mássico do componente gasoso diminui. O *Holdup* calculado através do modelo Homogêneo é diretamente proporcional

ao fluxo mássico do componente líquido, comportamento esperado conforme a definição dessa variável. O gradiente de pressão é diretamente proporcional ao *Holdup*, mesmo comportamento observado nas medições experimentais utilizadas. Na análise do modelo de Beggs e Brill observou-se um comportamento similar do *Holdup* com o fluxo mássico do componente líquido em relação ao observado no modelo Homogêneo. O gradiente de pressão calculado através deste modelo também é diretamente proporcional ao *Holdup*. É importante destacar que essas análises são válidas para o escopo e considerações aplicados a este trabalho.

A comparação do *Holdup* calculado em ambos os modelos com o medido experimentalmente chegou em um resultado satisfatório. Constatou-se que o *Holdup* é uma variável com um alto grau de complexidade de medição e de predição, portanto a utilização de modelos teóricos para seu cálculo naturalmente gera um resultado sem precisão. Em linhas gerais, os resultados obtidos no modelo de Beggs e Brill ficaram mais próximos do resultado medido experimentalmente, quando comparado com o modelo Homogêneo.

Em relação ao gradiente de pressão o modelo de Beggs e Brill também apresentou valores mais próximos aos valores medidos, quando comparados ao modelo Homogêneo. O modelo homogêneo ficou 29% distante do valor medido na 11^a medição, enquanto na 6^a medição o modelo de Beggs e Brill chegou a um resultado 1% diferente. Ocorreu uma variação significativa dos percentuais ao longo das medições, o que impossibilita chegar a um valor médio de diferença da aplicação dos modelos para o cálculo de gradiente de pressão. Para isso, recomenda-se a utilização de uma fonte de dados experimentais com um número maior de medições a fim de entender o comportamento dos modelos para diversas condições e padrões de escoamento. Outra sugestão para futuros trabalhos é a utilização de fluidos com diferentes massas específicas, além da aplicação de outros modelos de previsão de gradiente de pressão. Em nível de pós-graduação pode ser realizado uma simulação computacional para o cálculo de gradiente de pressão em escoamento multifásico.

Referências

- BAKER, O. Simultaneous flow of oil and gas. *Oil and Gas Journal*, 1954. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 24.
- BEGGS, D. H.; BRILL, J. P. A study of two-phase flow in inclined pipes. *One Petro*, 1973. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 36.
- BRAGA, G. F. Aplicação dos modelos de beggs e brill, homogêneo e de deslizamento para previsão de queda de pressão em escoamentos bifásicos horizontais Água-Óleo. *UNICAMP*, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 26 e 28.
- BRILL, J. P.; MUKHERJEE, H. *Multiphase Flow in Wells*. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers Inc., 1999. Citado na página 17.
- CASTRO, M. S. de. Fenômeno de transição espacial do escoamento Óleo pesado-Água no padrão estratificado. *USP - São Carlos*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- FOX, R. W. Introdução à mecânica dos fluidos. v. 6, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- GUEDES, T. A. L. Modelagem do escoamento em linhas de produção offshore com garantia de escoamento. *COPPE - UFRJ*, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 17, 39 e 40.
- ISHII, M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France*, 1975. Citado na página 28.
- ISHII, M.; HIBIKI, T. *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. [S.l.]: Springer, 2011. v. 2. Citado na página 28.
- LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress*, 1949. Citado na página 28.
- MANDHANE, J. M. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *Department of Chemical Engineering - University of Calgary*, 1973. Citado 3 vezes nas páginas 14, 25 e 58.
- PEREIRA, U. L. Análise do escoamento multifásico de petróleo em linhas de produção de campos maduros. *Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia*, 2009. Citado na página 14.
- PROVENZANO, C. E. C. Previsão numérica de escoamento bifásico em tubulações utilizando o modelo de deslizamento. *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 27.
- ROCHA, D. B. da. Validação de uma bancada experimental para estudo do escoamento bifásico ar-Água. *Universidade de Brasília*, 2019. Citado na página 26.
- SHOHAM, O. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1. Citado 8 vezes nas páginas 22, 23, 24, 27, 28, 33, 35 e 47.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. Análise de escoamentos bifásicos gás-líquido em tubulações. *Aiche Journal*, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 24.

VELEZ, M. V. P. Análise de escoamentos bifásicos gás-líquido em tubulações. *UNICAMP*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 25.

WALLIS, G. B. One-dimensional two-phase flow. Nova York, 1969. Citado 4 vezes nas páginas 17, 26, 27 e 30.

WHALLEY, P. B. *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. [S.l.]: Oxford University Press, 1996. Citado na página 21.

Apêndices

APÊNDICE A – Código do Modelo Homogêneo

```
clc, clear all, close all
```

```
% MODELO HOMOGÊNEO PARA PREVISÃO DE GRADIENTE DE PRESSÃO EM UM ESCOAMENTO  
% BIFÁSICO HORIZONTAL AR-ÁGUA
```

```
%DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS BÁSICAS
```

```
rho_ar = 1.225;           %Massa específica do ar em kg/m^3  
rho_ag = 995;             %Massa específica da água em kg/m^3  
diam = 0.052;            %Diâmetro da tubulação em m  
g = 9.81;                %gravidade em m/s^2  
mi_ag = 0.001;           %Viscosidade Dinâmica da Mistura em kg/m*s  
mi_ar = 17.2 * 10^-6;    %Viscosidade Dinâmica do ar em kg/m*s  
comp = 10;               %comprimento da tubulação em m  
k_r = 0.000005;          %Rugosidade da Tubulação
```

```
%Introdução dos dados em forma de vetores
```

```
%Vazão mássica do ar em kg/s  
W_ar = [];  
%Vazão mássica da água em kg/s  
W_ag = [];  
W = W_ar + W_ag; % Vazão Mássica da Mistura
```

```
%Cálculo da Vazão Volumétrica
```

```
Q_ar = W_ar./rho_ar; %Vazão volumétrica do ar em m^3/s  
Q_ag = W_ag./rho_ag; %Vazão volumétrica da água em m^3/s  
Q = Q_ar + Q_ag;
```

```
%Cálculo da Velocidade Superficial
```



```
J_ar = 4*Q_ar./((pi*diam^2)); %Velocidade Superficial do ar em m/s
J_ag = 4*Q_ag./((pi*diam^2)) ;%Velocidade Superficial da água em m/s
J = J_ar + J_ag; %Velocidade Superficial da Mistura, em m/s
```

```
alfa = J_ar./J; %fração de vazio para o modelo homogêneo
H = 1-alfa;
```

```
%Cálculo do Fluxo Mássico
```

```
G_ar = 4*W_ar./((pi*diam^2)); %Fluxo Mássico do ar em kg/m^2s
G_ag = 4*W_ag./((pi*diam^2)); %Fluxo Mássico da água em kg/m^2s
G = G_ar + G_ag;
```

```
%Cálculo do Número de Froud
```

```
Fr = J.^2./(g*diam);
```

```
%Massa Específica da Mistura
```

```
x = W_ar./W; %título
rho_m = 1./(((1-x)./rho_ag) + (x./rho_ar)); %Massa Específica da Mistura
```

```
%Cálculo do Fator de Atrito
```

```
mi = mi_ag*alfa+(mi_ar *(1-alfa));
Re = diam*J.*rho_m./mi; %Número de Reynolds
f_1 = k_r/(3.7 * diam);
f_2 = 5.16./Re;
f_3 = 5.09./(Re.^0.87);
```

```
f_d = (1./(-2*log(f_1-(f_2.*log(f_1+f_3))))).^2; %Fator de atrito
```

```
%Cálculo do Número de Mach
```

```
c_ag = 1435; %m/s
c_ar = 340; %m/s
```

```
%Velocidade do Som na Mistura (m/s)
```

```
cm=sqrt(1./(rho_m.*(((1-alfa)./(rho_ag + c_ag^2))+((1-alfa)./(rho_ar+c_ar^2)))));
```

```
Ma = J./cm; %Número de Mach
```

```
%Gradiente de Pressão
```

```
grad_p = (((f_d.*G.^2./(2*diam*rho_m)))+(rho_m.*g*sin(0)))./(1+(Ma).^2))*comp; %Grad
```

```
%gradiente de Pressão em mbar
```

```
grad_p_mbar = grad_p.* 0.01;
```

APÊNDICE B – Código do Modelo de Beggs e Brill

% MODELO DE BEGGS E BRILL PARA PREVISÃO DE GRADIENTE DE PRESSÃO EM UM ESCOAMENTO
% BIFÁSICO HORIZONTAL AR-ÁGUA

%DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS BÁSICAS

```
rho_ar = 1.225;           %Massa específica do ar em kg/m^3
rho_ag = 995;             %Massa específica da água em kg/m^3
diam = 0.052;            %Diâmetro da tubulação em m
g = 9.81;                %gravidade em m/s^2
mi_ag = 0.001;           %Viscosidade Dinâmica da Mistura em kg/m*s
mi_ar = 17.2 * 10^-6;    %Viscosidade Dinâmica do ar em kg/m*s
comp = 10;
k_r = 0.000005; %Rugosidade da Tubulação
```

%Introdução dos dados em forma de vetores

```
%pressão inicial em Pa
p = [];
%Vazão mássica do ar em kg/s
W_ar = [];
%Vazão mássica da água em kg/s
W_ag = [];
```

```
W = W_ar + W_ag;
```

%Cálculo da Vazão Volumétrica

```
Q_ar = W_ar./rho_ar; %Vazão volumétrica do ar em m^3/s
Q_ag = W_ag./rho_ag; %Vazão volumétrica da água em m^3/s
Q = Q_ar + Q_ag;
```

%Cálculo da Velocidade Superficial

```

J_ar = 4*Q_ar./((pi*diam^2)); %Velocidade Superficial do ar em m/s
J_ag = 4*Q_ag./((pi*diam^2)) ;%Velocidade Superficial da água em m/s
J = J_ar + J_ag; %Velocidade Superficial da Mistura, em m/s

%Massa Específica da Mistura

x = W_ar./W; %título
rho_m = 1./(((1-x)./rho_ag) + (x./rho_ar));

% Correlação Holdup
Fr = J.^2/(g*diam); %Número de Froude
lambdaL = Q_ag./Q; %Fração volumétrica do líquido

% a b e c são constantes para os padrões distribuídos
a = 1.065;
b = 0.5824;
c = -0.0609;
H = a*lambdaL.^(b).*Fr.^(c); %Holdup Calculado

% CÁLCULO FATOR DE ATRITO
mi = mi_ag*(1-H)+(mi_ar *(H)); %viscosidade da mistura
Re = diam * J.* rho_m./mi; %Número de Reynolds

f_1 = k_r/(3.7 * diam);
f_2 = 5.16./Re;
f_3 = 5.09./(Re.^0.87);

f_d = (1./(-2*log(f_1-(f_2.*log(f_1+f_3)))))^2; %Fator de atrito de Darcy

%componente y para cálculo da correlação de fator de atrito
y = (lambdaL)./H.^2;

% componente F para cálculo da correlação de fator de atrito
F = (log(y))./((3.82*log(y))-(0.0523)-(0.8725*log(y).^2)+(0.01853*log(y).^2));

%Calculando e^F
vector = [];
for i = 1 : length(F)

```

```
        vector(i) = exp(1)^(F(i));  
    end  
  
    f_bb = f_d.*vector; %Correlação de fator de atrito para o modelo de Beggs e Brill  
  
%GRADIENTE DE PRESSÃO DE BEGGS E BRILL  
  
%Gradiente de pressão em Pa  
Ek = (J.*J_ar.*rho_m./(p));  
grad_p = (((f_bb.*rho_m.* J.^2)./(2*diam))+(rho_m.*g*sin(0)))./(1-Ek))*comp;  
  
grad_p_mbar = grad_p.*0.01; %Gradiente de pressão em mbar
```